

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE GRADO

**CENTRAL DE GENERACIÓN
GEOTÉRMICA.**

**EVALUACIÓN SISTEMA DE
CONDENSACIÓN Y EXTRACCIÓN DE
INCONDENSABLES**



JUAN JAVIER MENDOZA BACHILLER

FEBRERO 2014

**TUTOR:
ANTONIO SORIA VERDUGO**





AGRADECIMIENTOS

Es complicado el poder mencionar a todas aquellas personas que me han ayudado a hacer posible este proyecto, que han estado ahí cuando lo he necesitado y animado a poder terminar este proyecto. Dado la complejidad de encontrar información fiable su apoyo a sido un pilar fundamental.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor Antoni Soria Verdugo la posibilidad de poder realizar este proyecto que gracias a su paciencia y conocimiento se ha podido mostrar una nueva optativa de obtención de energía eléctrica.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mis compañero de clase de la Universidad, Luis, Gonzalo, Isaac, Pablo, Dani, Álvaro, y Alberto. Con los que siempre he debatido argumentos para poder llegar a la mejor solución en clase y sin los cuales habría sido todo más arduo.

En último lugar, pero el más importante a mi familia y novia Ana. Sin los cuales habría sido completamente imposible haber llegado hasta aquí, ya que gracias a su apoyo, compresión y afecto han sido la guía para terminar la carrera y el proyecto.



RESUMEN

El siguiente proyecto de fin de grado presenta una optativa de diseño que refleja una nueva posibilidad de central geotérmica, discriminado entre los diferentes tipos de tecnologías que existen a día de hoy para este propósito. Un tipo de central geotérmica que podría llegar a implantarse en un mayor número de zonas geográficas. Aunque en este estudio se ha situado en una instalación en el yacimiento de Roquetas del mar (Andalucía, España).

Se explota un yacimiento geotérmico de roca seca fracturada, que en principio se desecha por carecer de un fluido que sirva de caloportador de la central. El sistema de explotación es mediante hidrofracturación. Técnica que crea mayor número de fracturas y además maximiza el número de interconexiones entre las mismas, fomentando una mayor área de transferencia de calor dentro del yacimiento geotérmico. Todos estos hechos facilitan la instalación de un mayor número de centrales en las cual se puede inyectar el fluido a artificialmente.

Es trabajo de aprovechamiento de energía geotérmica mediante una central de 25 MWe de tipo flash con apoyo de una caldera de biomasa de lecho fluidizado. La generación de energía eléctrica es a partir del expansionado del vapor dentro de una turbina de condensación, la cual tiene una alta eficiencia.

Se profundiza en mayor medida en el diseño, cálculo y dimensionado del sistema de condensación y extracción de incondensables. Se presentan análisis de condensador barométrico de contacto directo para diferentes condiciones de cálculo, que reflejen las ventajas del apoyo de una caldera de biomasa. El análisis antes mencionado se hace similar pero para el sistema de extracción de incondensables (tales como el aire principalmente), formado por sistema híbrido de dos eyectores de vapor, dos intercondensadores y apoyo de una bomba de vacío de anillo líquido.



ABSTRACT

This Final Degree Project shows an optional design which reflects a new possibility of a geothermal power station. It was discriminated between some current technologies to select the know-how under study. This type of power station can be implemented in a great number of locations. Although, the studied plant was located in a known exploitation named Roquetas del Mar in Spain.

The geothermal field of dry rock is exploited, it would be thrown away because of a deficiency of the heat transfer fluid in the first place. Hence, the system of exploitation proposed consists on a hydro-fracturing process. This technique creates a huge number of breakages and it also maximizes the number of inter-connections between these. This mode involves the growth of the heat transfer area into this geothermal field. According to this main idea, all this facts can provide the installation of a great number of plants.

Additionally, this operating system of flash type (of 25MWe) is carried out with the help of a biomass boiler. This type of boiler is characterized by its fluidized bed system. This generation is the result of spreading vapor into the condensing turbine, which has a highest efficiency.

A main objective is to go in-depth on designs, calculations and dimensions not only of the condensation system, but the condensable extraction system. It is showed the specific analysis in different ways of a direct contact barometric condenser. These different possibilities reflect the benefits of the auxiliary biomass boiler. This analysis aforementioned is developed in a similar way, but highlighting the advantages of the incondensable extraction. These incondensable are mainly the air, the hybrid system is formed by two ejector steam. Particularly, it consists of two inter-condensators and a liquid ring vacuum pump.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	16
3. TIPOS DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS	17
3.1 YACIMIENTO HIDROTÉRMICO DE PREDOMINIO DE VAPOR	19
3.2 YACIMIENTO DE AGUA CALIENTE	22
3.4 YACIMIENTO GEOPRESURIZADO	23
3.5 YACIMIENTOS DE ROCA CALIENTE SECA	23
4. TECNOLOGÍA EGS	25
4. 1 DEFINICIÓN	25
4.2 PARÁMETROS PRINCIPALES DEL YACIMIENTO	26
4.2.1 TEMPERATURA DEL YACIMIENTO	26
4.2.2 VOLUMEN DE LA ROCA FRACTURADA	28
4.2.3 ESPACIADO DE LAS FRACTURAS	29
4.2.3 SUPERFICIE DE LAS FRACTURAS	30
4.2.4 PROFUNDIDAD DE LA CAPA DE SEDIMENTOS	31
4.2.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	32
4.3 ESTIMULACIÓN HIDRAÚLICA	32
4.4 PROBLEMAS DE LA ESTIMULACIÓN HIDRAÚLICA	36
4.5 ESTIMULACIÓN TÉRMICA	37
4.6 ESTIMULACIÓN QUÍMICA	37
4.7 ESTIMULACIÓN POR EXPLOSIVOS Y PROPELENTES	38
5. TIPOS DE CENTRALES GEOTÉRMICAS	40
5.1 CENTRALES DE CONVERSIÓN DIRECTA (DIRECT-STEAM)	41
5.2 CENTRALES DE FLASH SIMPLE	44
5.3 CENTRALES DE FLASH DOBLE	46
5.4 CENTRALES DE CICLO BINARIO	48
5.5 CICLO KALINA	50
5.6 CENTRALES DE CICLO HÍBRIDOS	51
6. SITUACIÓN DE YACIMIENTO GEOTERMICO	52
7. CENTRAL GEOTÉRMICA INICIAL	55
8. DISCRIMINACIÓN DE TECNOLOGÍA	56
8.1 SILENCIADOR	56



8.2 CÁMARA FLASH O SEPARADOR	57
8.2.1 SEPARADOR DE VUELTA EN U	58
8.2.2 SEPARADOR EN LÍNEA	60
8.2.3 SEPARADORES HORIZONTALES	60
8.2.4 SEPARADOR CICLÓNICOS	61
8.3 SEPARADOR DE HUMEDAD	68
8.4 SEPARADOR ATMOSFÉRICO	68
8.5 TANQUE DE RECOLECCIÓN	69
8.6 TURBINAS DE VAPOR	69
8.6.1 PRINCIPIOS DISEÑO	70
8.6.2 PARTES PRINCIPALES	70
8.6.3 TURBINA DE ACCIÓN	77
8.6.4 TURBINA DE REACCIÓN	77
8.6.5 TURBINA DE CONTRAPRESIÓN	78
8.6.5 TURBINA DE CONDENSACIÓN	79
8.6.6 ELECCIÓN ENTRE UNA TURBINA DE CONTRAPRESIÓN Y UNA TURBINA DE CONDENSACIÓN	81
8.7 BOMBAS HIDRAÚLICAS	81
8.7.1 PARTES PRINCIPALES	83
8.7.2 BOMBAS VERTICALES "LINESHAFT"	85
8.7.3 BOMBA SUMERGIBLE (ESP)	86
8.8 CALDERA DE BIOMASA	87
8.8.1 TECNICAS PARA COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA	88
8.8.2 SISTEMAS DE PARILLA	88
8.8.3 HOGARES ROTATIVOS	90
8.8.4 QUEMADORES DE TORNILLO	90
8.8.5 CÁMARAS TORSIONALES	90
8.8.6 COMBUSTIÓN DE LECHO FLUIDO	91
8.9 TORRE DE REFRIGERACIÓN	92
9. CONDENSADOR	93
9.1 CONDENSACIÓN	93
9.2 CONDICIONES DE VACÍO	95
9.3 TIPOS DE CONDENSADORES	96



9.3.1 CONDENSADORES DE SUPERFICIE	96
9.3.2 CONDENSADORES DE CONTACTO DIRECTO	99
9.3.3 MATERIALES DE FABRICACIÓN DE LOS CONDENSADORES DE CONTACTO DIRECTO.....	103
9.4 CONDENSADOR SELECCIONADO	104
9.4.1 SISTEMAS DE SEGURIDAD	104
9.4.2 VÁLVULAS DE VACÍO.....	104
9.4.5 DISCOS DE RUPTURA	104
10. SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE INCONDENSABLES.....	106
10.1 BOMBA DE VACÍO DE PALETAS.....	106
10.2 BOMBA DE VACÍO DE DIAFRAGMA	107
10.3 BOMBA DE VACÍO DE LÓBULOS	108
10.4 BOMBAS DE ANILLO LÍQUIDO.....	109
10.5 EYECTORES DE VAPOR	110
10.6 EXTRACCIÓN MULTITAPA DE EYECTORES DE VAPOR.....	113
10.7 EXTRACCIÓN MULTITAPA DE BOMBAS DE VACÍO DE ANILLO LÍQUIDO	114
10.8 EXTRACCIÓN MULTITAPA HÍBRIDA.....	115
11. SELECCIÓN FINAL Y PARÁMETROS DE DISEÑO	117
11.1 SITUACIÓN DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO	117
11.2 FLUIDO DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO	118
11.3 FUNCIONAMIENTO DE LA CENTRAL SELECCIONADA.....	118
11.4 RESUMEN DE ELEMENTOS PRINCIPALES SELECCIONADOS	120
11.4.1 SILENCIADOR.....	120
11.4.2 SEPARADORES.....	120
11.4.3 CALDERA.....	121
11.4.4 TURBINA DE VAPOR	121
11.4.5 CONDENSADOR. CONDICIONES DE CÁLCULO	122
11.4.6 EXTRACCIÓN DE INCONDENSABLES. CONDICIONES DE CALCULO	124
11.4.7 BOMBA.....	129
12. ANÁLISIS DE RESULTADOS	130
12.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL SISTEMA DE CONDENSACIÓN.....	134
12.1.1 ÁNALISIS DE SENSIBILIDAD CONDENSADORES PRINCIPALES	135



12.2 ÁNALISIS DE SENSIBILIDAD DE DIMENSIONES DE EYECTORES DE VAPOR.....	138
13. CONCLUSIONES	142
14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
ÁNEXO 1 (CÁLCULO CENTRAL GEOTÉRMICA ESTANDAR)	146
ANEXO 2 (CÁLCULOS DEL CONDENSADOR BAROMÉTRICO)	154
ANEXO 3 (CÁLCULO DE LOS INTERCONDENSADORES)	170
ANEXO 4 (CÁLCULO DE EYECTORES DE VAPOR)	171
ANEXO 3 (TABLAS)	189
14. PLANOS	191



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de las capas de la tierra [16].....	17
Figura 2. Composición del suelo de Cierro Prieto, México [4]	19
Figura 3. Representación de la Otake, Japón [4]	20
Figura 4. Representación de un diagrama Ph.....	20
Figura 5. Composición de un yacimiento hidrotérmico [16]	21
Figura 6. Representación de yacimiento EGS [7].....	26
Figura 7 configuración de fracturas de distintos tipos en una estimulación en doblete en los Alamos, Camborne y Soultz [7]	29
Figura 8. Representación esquemática de los factores a tener en cuenta al implanta un sistema EGS [7]	31
Figura 9. Mapa de EEUU que muestra la anchura de capa de sedimento [7]	31
Figura 10. Representación de "Drill Paker".....	34
Figura 11. Esquema de funcionamiento de un geófono [13]	35
Figura 12. Tecnología de EGS a varias alturas [7]	36
Figura 13. Estimulación por propelentes [7]	39
Figura 14. Esquema de una central geotérmica con un Rankine estandar.....	40
Figura 15. Esquema de una central de conversión directa.	42
Figura 16. Esquema de una central del tipo Flash	45
Figura 17. Esquema de la cámara flash de una central geotérmica.	46
Figura 18. Esquema de una central de flash doble.....	47
Figura 19. Esquema de una central de Ciclo Binario.....	49
Figura 20. Esquema de una central de Ciclo de Kalina.....	50
Figura 21. Representación de los posibles yacimiento geotérmicos en España [16]	52
Figura 22. Mapa de potencia geotérmica de la provincia de Andalucía (las zonas rojas son de 80-100MW) [23]	53
Figura 23. Representación del lugar de elección del yacimiento geotérmico [23]	54
Figura 24. Esquema Preliminar de la central a diseñar.....	55
Figura 25. Silenciador típico de las centrales geotérmicas [19]	56
Figura 26. Silenciador fonoacústico de Peerless [30].....	57
Figura 27. Separador en U de Alfa Laval [31]	58
Figura 28. Separador en línea alfa Laval [31].....	60
Figura 29. Separador horizontal Alfa Laval [31].....	61
Figura 30. Diferentes configuraciones de un separador ciclónico [22].....	62
Figura 31. Dimensionado sencillo de un separador ciclónico [22].....	64
Figura 32. Dos zonas separa por el llamado cilindro Stairmand [10].....	65
Figura 33. Representación de fuerzas en un ciclón [10]	66
Figura 34. Separador de humedad de la compañía TLV [33]	68
Figura 35. Sección de una turbina de vapor [24]	71
Figura 36. Rotor de unan turbina de vapor de 100 MW [24].....	72
Figura 37. Drain Hole Figura 38. Rasgado de perfil.....	73
Figura 39. Fotografía de cojinetes de Empuje [24]	74



Figura 40. Esquema de un sello Laberítico.....	76
Figura 41. Sección de turbina contrapresión [2].....	79
Figura 42. Sección de turbina de condensación [2].....	80
Figura 43. Sección de turbina condensación con extracción de vapor [2].....	80
Figura 44. Característica de bombeo de líquido en EGS.....	82
Figura 45. Molten Salt VTP Pump [29].....	86
Figura 46. Byron Jackson SUBM Geothermal Deep-Well Submersible [29].....	87
Figura 47. Caldera de Biomasa de parrilla inclinada [15].....	89
Figura 48. Esquema de caldera de lecho Fluidizado [15].....	92
Figura 49. Torre de refrigeración de tiro natural [12].....	92
Figura 50. Condensación homogénea [17].....	94
Figura 51. Condensación de contacto directo [17].....	94
Figura 52. Condensación en Película [17].....	95
Figura 53. Condensación en Gotas [17].....	95
Figura 54. Corte ideal de un Condensador Foster Wheeler de doble Circulación [10]....	97
Figura 55. Condensador a contracorriente de tipo Spray [5].....	100
Figura 56. Spray de tipo espiral anti-obstrucción [9].....	101
Figura 57. Condensador de corriente paralela de tipo Spray [5].....	102
Figura 58. Condensador de bandejas a contracorriente [5].....	103
Figura 59. Esquema de disco de ruptura.....	105
Figura 60. HPE Pressure&Vacuum technology Bomba de paletas [35].....	107
Figura 61. HPE Wilden. Bomba de diafragma [35].....	108
Figura 62. Bomba de lóbulos.....	109
Figura 63. Bomba de anillo líquido (NASH) [32].....	109
Figura 64. Identificación de los elementos de un eyector a presión.....	110
Figura 65. Representación de los lugares donde se producen cambios en un eyector.....	111
Figura 66. Representación de la velocidad y la presión de los fluidos a través del eyector.....	112
Figura 67. Esquema de un sistema de extracción multietapa de eyectores de vapor.....	113
Figura 68. Representación un sistema de extracción multietapas de bombas de vacío de anillo líquido.....	114
Figura 69. Sistema de extracción híbrida.....	115
Figura 70. Mapa de situación geográfica y temperatura de Roquetas del Mar, Andalucía [23].....	118
Figura 71. Esquema de la instalación final de una central geotérmica flash con apoyo de una caldera de biomasa.....	119
Figura 72. Representación del eyector de vapor diseñado.....	139
Figura 73. Condensador de contacto directo contracorriente tipo Spray [5].....	154
Figura 74. Hoja de catálogo de Leichler [36].....	167
Figura 75. Disposición aproximada de rociadores según distribución.....	168
Figura 76. Representación de las longitudes de cálculo del eyector de vapor [5].....	185



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presiones del agua saturada a distintas temperaturas y de diferentes sustancias [19]	49
Tabla 2. Composición del fluido de trabajo [9]	118
Tabla 3. Longitudes de los eyectores a partir de la dimensiones de sus garganta [5], [25]	129
Tabla 4. Resumen de los parámetros más característicos del condensador principal, (120°C)	134
Tabla 5. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 1, (120°C)	135
Tabla 6. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 2, (120°C)	135
Tabla 7. Resumen de los parámetros más característicos de la turbina (150°C)	151
Tabla 8. Resumen de los parámetros más característicos del condensador, anexo 1 (150°C)	151
Tabla 9. Resumen de los parámetros más característicos de la bomba (150°C)	151
Tabla 10. Resumen de los parámetros más característicos del yacimiento (150°C)	151
Tabla 11. Resumen de los parámetros más característicos del separador (150°C)	151
Tabla 12. Rendimiento (150°C)	152
Tabla 13. Resumen de los parámetros más característicos de la turbina (180°C)	152
Tabla 14. Resumen de los parámetros más característicos del condensador, anexo 1 (180°C)	152
Tabla 15. Resumen de los parámetros más característicos de la bomba (180°C)	152
Tabla 16. Resumen de los parámetros más característicos del yacimiento (180°C)	152
Tabla 17. Resumen de los parámetros más característicos de la caldera de Biomasa (180°C)	152
Tabla 18. Resumen de los parámetros más característicos del separador (180°C)	153
Tabla 19. Rendimiento (180°C)	153
Tabla 20. Resumen de los parámetros más característicos del condensador barométrico de contacto directo de tipo spray, anexo 2 (150°C)	168
Tabla 21. Resumen de los parámetros más característicos del condensador barométrico de contacto directo de tipo spray, anexo 2 (180°C)	169
Tabla 22. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 1 (120°C)	170
Tabla 23. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 2 (120°C)	170
Tabla 24. Extracto de [6] para determinar el número de etapas de eyectores	171
Tabla 25. Longitudes de los eyectores a partir de la dimensiones de sus garganta [5], [25]	184
Tabla 26. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 1 (150°C)	186
Tabla 27. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 2 (150°C)	187
Tabla 28. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 1 (180°C)	187
Tabla 29. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 2 (180°C)	188
Tabla 30. Propiedades del agua saturada [17]	189
Tabla 31. Propiedades del agua líquida a 1 atmósfera [17]	190
Tabla 32. Densidad del aire en (lb/ft ³) a diferentes presiones [2]	190
Tabla 33. Extracto de recomendaciones de velocidades (cambiadas las unidades) [5]	190



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Cálculo del coeficiente R_t [6]	127
Gráfica 2. Cálculo del coeficiente R_W [6]	127
Gráfica 3. Nomograma para hallar R_3 [6]	128
Gráfica 4. Comparación de flujo másico de gas a 25 MWe	131
Gráfica 5. Comparación de flujo líquido de la bomba.....	131
Gráfica 6. Comparación de potencia de la bomba hidráulica	132
Gráfica 7. Comparación de potencia del condensador.	132
Gráfica 8. Comparación de potencia de la caldera de biomasa.	133
Gráfica 9. Comparación % de potencia térmica de caldera frente yacimiento.....	133
Gráfica 10. Comparación de rendimiento térmico de la central	134
Gráfica 11. Comparación de sección de entrada de vapor del condensador principal.	136
Gráfica 12. Comparación de sección de entrada de refrigerante del condensador principal...	136
Gráfica 13. Comparación de sección de salida de incondensables del condensador principal	137
Gráfica 14. . Comparación de sección de pierna barométrica del condensador principal.	137
Gráfica 15. . Comparación de número de rociadores del condensador principal	138
Gráfica 16. Comparación de diámetro del condensador Principal.....	138
Gráfica 17. Comparación de diámetro de garganta del eyector de vapor.....	139
Gráfica 18. Comparación de la longitud del difusor del eyector de vapor.....	140
Gráfica 19. Comparación de la longitud desde el inyector al final de la conicidad del eyector de vapor.	140
Gráfica 20. Comparación de la longitud total del eyector de vapor.....	140
Gráfica 21. Comparación del flujo de arrastre del eyector de vapor.....	141
Gráfica 22. Comparación del flujo motriz del eyector de vapor.....	141
Gráfica 23. Representación para sacar el número de Fourier [1].....	159
Gráfica 24. Utilización de representación para sacar el número de Fourier [1]	162
Gráfica 25. Utilización de la tabla para hallar el R_w , eyector 1 [6]	174
Gráfica 26. Utilización de la tabla para hallar el R_t , eyector 1 [6]	175
Gráfica 27. Utilización de la grafica para hallar el R_w , eyector 1 [6]	176
Gráfica 28. Utilización de la grafica para hallar el R_t , eyector 1 [6].....	176
Gráfica 29. Utilización de la grafica para hallar el R_w , eyector 1 [6]	178
Gráfica 30. Utilización de la grafica para hallar el R_t , eyector 1 [6].....	178
Gráfica 31. Utilización de la nomograma hallar el R_3 , eyector 1 [6]	180
Gráfica 32. Utilización de la nomograma hallar el R_3 , eyector 2 [6]	183





1. INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es aquella que puede obtenerse del interior de la tierra. Su uso tiene procedencia de la prehistoria, en el cual su uso era bañarse en aguas terapéuticas. Es conocido por todo su uso por los Etruscos para sus trabajos manuales de cerámica. La primera máquina que generó electricidad alimentada por vapor geotérmico fue instalada en Larderello (Italia) en 1904 y tenía una potencia de 10 MWe.

Debido a la incesante modernización de todo el planeta cada vez es más necesario obtener más energía eléctrica. Los combustibles fósiles gracias a sus propiedades generan mucha energía con un consumo pequeño de sus recursos, sin embargo sus reservas no son ilimitadas y además es contaminante.

Esta constante preocupación sobre la obtención de energía llevado a explorar otras alternativas de obtención de energía renovables, las cuales posibilitan la obtención de energía limpia e inagotables si no se lleva al límite su explotación. Aquí es donde entra el papel de las centrales geotérmicas para obtener energía limpia y renovable de una manera regular.

Las centrales geotérmicas están basadas en los ciclos Rankine, donde en vez de tener una caldera se tiene un yacimiento geotérmico. Utiliza un yacimiento para crear vapor que al llegar a la turbina transforma la energía cinética de vapor en energía mecánica (movimiento del rotor de la turbina) y con esta energía mecánica mueve el rotor del generador de electricidad.

Por último un elemento muy importante de la central es el condensador el cual ayuda a expandir en mayor medida el vapor procedente de la turbina y así obtener más energía. Además consigue transformar el vapor en líquido para poder enviarlo de nuevo al yacimiento y reutilizarlo para una nueva utilización.



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El principal objetivo del proyecto es presentar una nueva optativa de central geotérmica la cual fomente el número de zonas de explotación de energía procedente del subsuelo.

Se distingue entre el tipo de tecnología principalmente de una manera cualitativa y general, exponiendo su funcionamiento y como se adaptaría a un yacimiento de roca seca fracturada, donde el fluido de trabajo se introduce artificialmente. Se entra en mayor detalle en el cálculo del condensador como el de de extracción de incondensables.

Una vez seleccionada el tipo de tecnología más acorde, se observa mediante balances de energía como mejoraría la central un apoyo de una caldera alimentada de biomasa. Biomasa a la cual se podría aumentar su potencial calorífico si se mezcla en una pequeña medida de carbón nacional. El carbón nacional debido a su contenido de azufre es desechado , pero solventando ese problema con caliza en la mezcla se resolvería el problema.

Para el cálculo del condensador se han presentado el estudio de comportamiento del refrigerante utilizado para condensador y como influiría en el tamaño del condensador. Además de determinar mediante balances de energía la cantidad de refrigerante. Para las secciones de de los orificios del condensador se han tenido en cuenta principalmente las normas de HEI (Heat Exchange Institute).

El cálculos del sistema de extracción están basados en tablas realizadas de estudios experimentales sacadas de varias fuentes de publicaciones aprobadas y normas de HEI. Además sacar su tamaños a través de análisis de fabricantes como koerting.

Por último todos estos resultados están basados para corroborar la idea de utilizar una central de tipo flash con apoyo de una caldera de biomasa.

3. TIPOS DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

Un recurso geotérmico es aquella parte de la energía geotérmica que puede ser utilizada por el hombre. Hoy en día, existen técnicas de perforación y extracción de fluidos geotérmicos que se utilizan en los ciclos de calor. Pero gran parte de los recursos nos son todavía explotables. debido a que la tecnología desarrollada hasta ahora no permite aprovechar su energía o su utilización sea rentable.

El calor almacenado en el subsuelo se transporta a la superficie mediante agua almacenada en el acuífero y , según sea su temperatura y presión, está puede estar en forma de vapor o de líquido o ser mezcla de ambos. Para que la energía pueda ser explotada deben presentarse unas condiciones geológicas determinadas y, en este caso, diremos que se trata de un yacimiento geotérmico. Las condiciones geológicas básicas son las citadas a continuación:

- Existencia de un flujo de calor elevado capaz de calentar suficientemente el agua o el vapor. Generalmente el flujo de calor elevado es consecuencia de una fuente de calor (intrusión de ígnea joven) situada en la corteza superior (1-10 km)

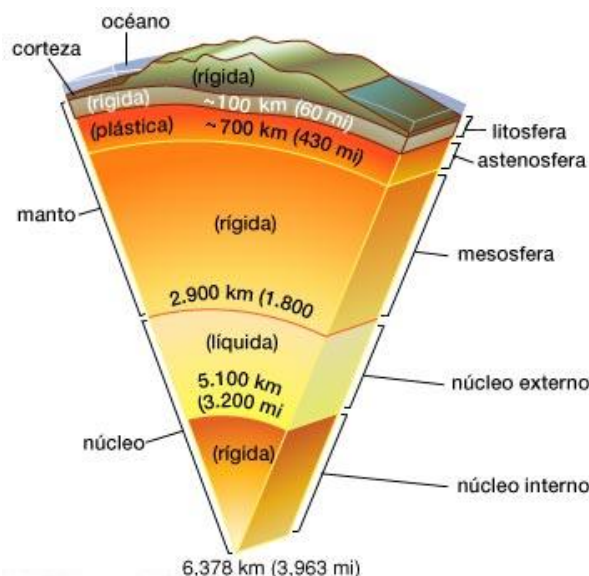


Figura 1. Composición de las capas de la tierra [16]

- Presencia de una capa de alta porosidad y permeabilidad (acuífero), a una profundidad razonable (no superior a 1-2km), que permita la acumulación y circulación de agua y/o vapor. Como el agua generalmente procede de la lluvia, se necesita una buena conexión entre el acuífero y la superficie con el fin de asegurar una recarga abundante.
- Una roca impermeable por encima del acuífero que actúe de cobertura e impida que el agua escape.



Según la temperatura del fluidos los yacimientos también se clasifican en:

- Alta entalpía más de 180 °C
- Media entalpía entre 100-180 °C
- Baja entalpía serán aquellos fluidos inferiores a 30-100 °C
- Muy baja entalpía menos de 25 °C

En los yacimientos de alta entalpía, el fluido sale generalmente en forma de vapor (ya sea seco o húmedo) y es fácil utilizarlo para la obtención de energía eléctrica en turbinas de vapor en una central, desde donde se transporta a los puntos de demanda propia de electricidad o se vierte a la red pública de transporte y distribución.

La energía geotérmica no sólo se una para producir electricidad si no que se aplicar en numerosos campos. En el caso de estar en una zona que haya un yacimiento de baja entalpía se suele utilizar para climatización convencional de viviendas, suelo radiante, etc., en media entalpía se suele utilizar en caso de Refinado de azúcar Obtención de agua destilada. En alta entalpía se suele emplear secado de madrea y algas, evaporación de soluciones concentradas, etc.

Las plantas convencionales de generación de energía geotérmica se limitan a temperaturas del fluido por encima de 150 °C (aunque en sistemas de ciclos binarios pueden utilizarse fluidos a temperaturas superiores a 85 °C).

En los yacimientos de baja entalpía no es viable el transporte de energía geotérmica a mucha distancia, por lo que su consumo siempre está cerca de su zona de explotación.

Hasta ahora se han comentado condiciones básicas, que deben cumplen muchos de los yacimientos de lo que se tiene constancia actualmente; sin embargo, algunos de estos requisitos pueden variar mucho de un yacimiento a otro, e incluso no pueden cumplirse totalmente.

Un elemento que suele ser básico es la presencia de agua, existen zonas de flujo de calor muy elevado pero donde hay una capa suficientemente permeable que permita el almacenamiento y la circulación de agua; en este caso puede fracturarse la roca artificialmente mediante una carga explosiva, y así facilitar la circulación de agua. En determinadas circunstancias también es posible utilizar la hidro-fracturación para crear estas grietas, así podremos inyectar agua desde la superficie, para después de ser calentada , extraerla por un pozo de producción y aprovechar su energía.

En otros casos , no existe una intrusión de ígnea directa y, aunque el flujo geotérmico sea normal, se dan unas determinadas condiciones geológicas que facilitan la circulación de agua a gran profundidad (varios km). Así, el agua alcanza temperaturas suficientemente elevadas que puedan hacer rentable su explotación.

De manera que existen una gran variedad de tipos de yacimientos geotérmicos según las particularidades propias de cada uno y es por tanto complicado de clasificar

de una forma absoluta, donde todos los yacimientos se vean incluidos. Por tanto según sus características podemos hacer una clasificación.

3.1 YACIMIENTO HIDROTÉRMICO DE PREDOMINIO DE VAPOR

La mayoría de los yacimientos geotérmicos que actualmente se explotan contienen agua a presión y temperaturas elevadas en el acuífero (alcanzando los 300°C). Se trata de yacimientos de alta entalpía, útiles para producción de electricidad. Normalmente este tipo de yacimientos llevan asociadas manifestaciones en la superficie, como geiseros, maniatales termales, , etc. Cuando el agua es transportada a la superficie, la presión disminuye bruscamente y se genera una gran cantidad de vapor. En la superficie se tiene una mezcla de líquido y vapor (agua saturada) que se lleva a un separador de fases para que el vapor seco sirva para alimentar la turbina de vapor. Estos son los llamados yacimientos de vapor húmedo por la presencia de agua en el cabezal del pozo.

Algunos de los ejemplos más actuales son los de Cierro Prieto (México), Otake (Japón), etc., Estos yacimientos además tiene en común que al estar ambas fases (vapor-líquido) en equilibrio, la presión y la temperatura de la mezcla será la de saturación. Además de facilitar estopara la obtención de valores como la entalpía.

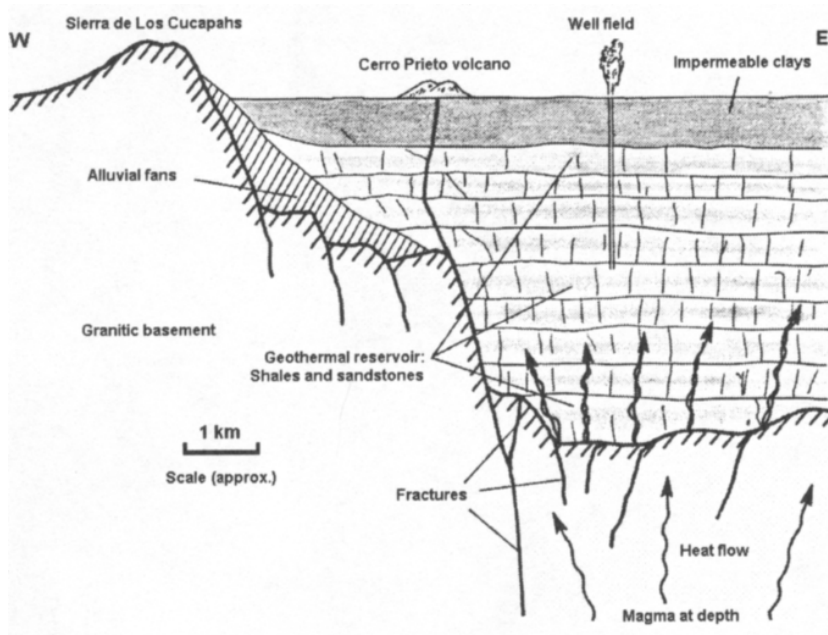


Figura 2. Composición del suelo de Cierro Prieto, México [4]

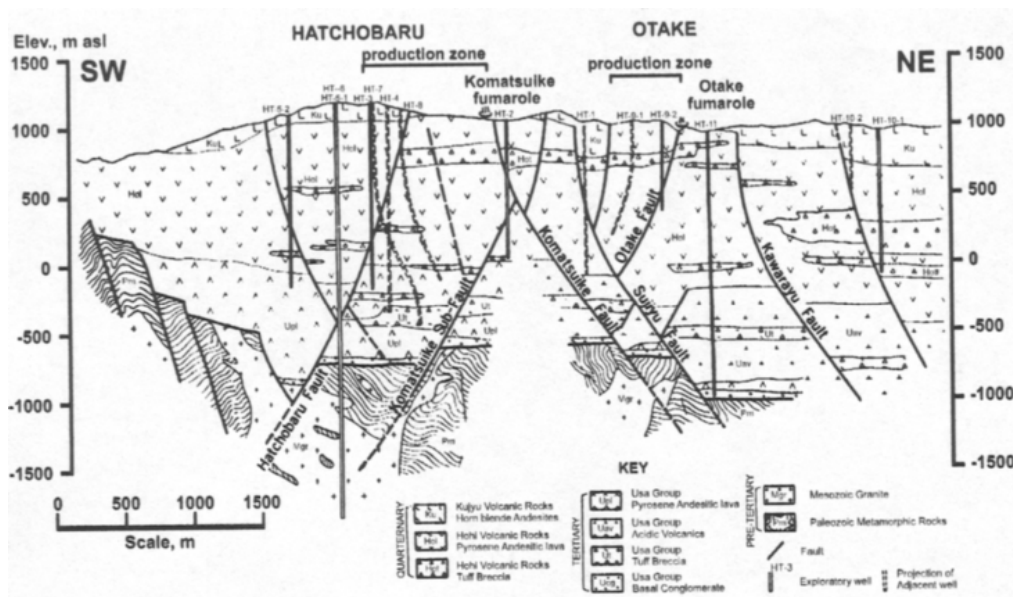


Figura 3. Representación de la Otake, Japón [4]

Otake

Si la presión del yacimiento, la temperatura es superior a la de saturación correspondiente, tendremos un vapor sobrecalentado sin contenido de agua líquida.

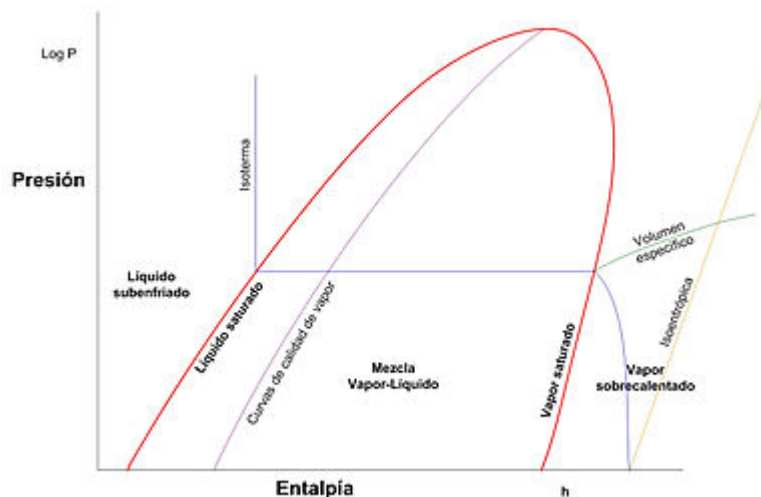


Figura 4. Representación de un diagrama Ph

Los yacimientos de vapor seco se caracterizan por unas condiciones termodinámicas próximas a las de máxima entalpía del vapor saturado (236 °C) y permiten obtener mejores rendimientos de las turbinas generadoras de electricidad.

En los yacimientos hidrotérmicos con predominio de vapor concurren todas las condiciones geológicas que se han enunciado anteriormente: una intrusión ígnea

como fuente de calor, un acuífero con buena recarga y una capa impermeable por encima del acuífero.

La fuente de calor. Generalmente estos almacenes se encuentran en regiones de volcanismo reciente (Mioceno-Cuaternario, menos de 25 millones de años) y por tanto la fuente de calor de magma puede estar a 700-1000 °C, situado algunos kilómetros de la superficie. Las intrusiones magmáticas ocurren en zonas de fuerte adelgazamiento litosférico con presencia de fallas que favorezcan la ascensión del magma. Existen determinadas estructuras en zonas con fuerte actividad tectónica como los graben (bloques hundidos y limitados por fallas normales) que son consecuencia de un régimen de esfuerzos distensivos y, por tanto, con probable adelgazamiento litosférico. El magma se encuentra por tanto más cerca de la superficie y además puede ascender por las fallas.

El acuífero. Por encima de la fuente de calor, en la capa permeable, se producen corrientes de convección del agua caliente o de vapor, de manera que hay una homogenización de la temperatura entre el techo y la base del acuífero. Normalmente, la formación permeable debe aflorar o tener una buena conexión hidráulica con la superficie para permitir la entrada de agua meteórica. En caso contrario se necesita una conexión mediante un sistema de fallas por donde el agua pueda infiltrarse en cantidad suficiente desde la superficie.

Capa impermeable. Sobre el acuífero tiene que haber una capa impermeable que mantenga el agua atrapada. Para evitar que el calor se pierda por convección no debe haber fisuras en la capa impermeable, lo cual a veces resulta difícil en una zona con actividad volcánica, puesto que los movimientos tectónicos asociados al propio volcanismo pueden provocar fisuras y producir un aumento de la permeabilidad. Por otra parte, las alteraciones hidrotermales de las rocas y la precipitación de minerales pueden favorecer el sellado de las fisuras de los materiales superficiales.

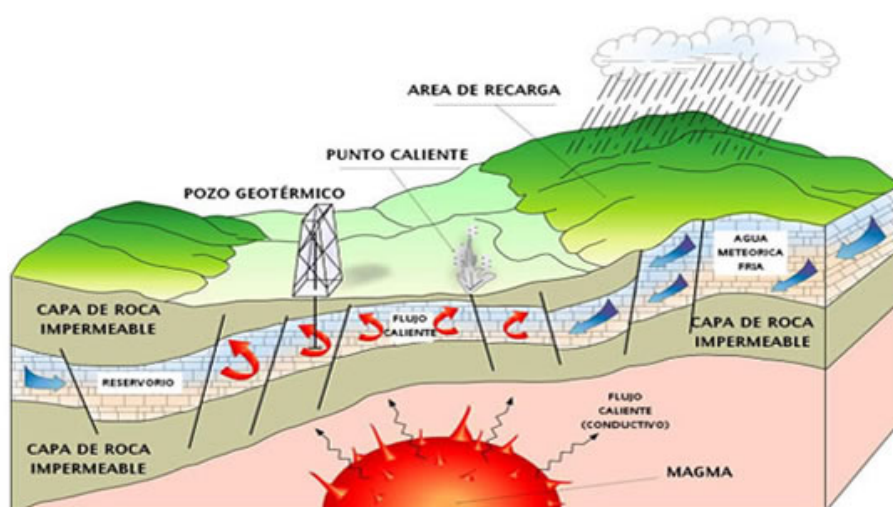


Figura 5. Composición de un yacimiento hidrotérmico [16]

3.2 YACIMIENTO DE AGUA CALIENTE

Cuando la temperatura del agua no llega a 100 °C o es algo superior y se encuentra a 1-3 km de profundidad, la fase dominante es siempre agua en estado líquido, y las condiciones geológicas son similares a las del agua subterránea fría. Se trata de yacimientos de baja entalpía. Estos yacimientos no llevan asociados manifestaciones superficiales. Sin embargo, las zonas donde pueden hallarse son mucho más extensas que los sistemas asociados a volcanismo.

Un yacimiento de estas características se diferencia por que el título de vapor del agua saturada es muy cercano a cero, por tanto el agua líquida es la fase predominante en el fluido bifase. En este caso no es necesario la presencia de una capa superior impermeable que mantenga el calor y la presión en el acuífero. No obstante, es preciso que la profundidad a la que se encuentra el acuífero y el gradiente de temperatura sean adecuados para permitir una circulación convectiva. Cuando no hay una capa impermeable, la temperatura del techo del acuífero debe ser inferior al punto de ebullición a presión atmosférica, de lo contrario se producirá una evaporación hacia la superficie. Estos yacimientos se localizan en diversos entornos geológicos del tipo con predominio de calor, pero en los que la fuente de calor es de menor intensidad. Así, pueden encontrarse en zonas de volcanismo y tectónica joven cenozoica (de menos de 60 millones de años), en zonas de adelgazamiento litosférico y también en zonas con elevada concentración de isótopos radioactivos. También pueden darse en cuencas sedimentarias profundas con temperaturas más bajas.

A diferencia de los yacimientos con predominio de vapor, la presión no es suficiente para elevar el agua hasta la superficie y se requiere la utilización de bombas sumergibles en los pozos de extracción. La excepción la constituyen los acuíferos geopresurizados.

Existen muchas diferencias en este tipo de yacimientos, por lo que es difícil establecer una recopilación a modo de clasificación; cada uno presenta unas singularidades propias.

En muchos casos la forma de extraer el agua del yacimiento consiste en perforar dos pozos: uno de extracción y otro de reinyección, situado a una cierta distancia del primero, que se utiliza para devolver el agua al acuífero una vez utilizada su energía térmica. Es muy aconsejable utilizar esta técnica cuando el agua es salina. De esta manera se consigue preservar el medio ambiente y mantiene la recarga y la presión del acuífero.

3.3 YACIMIENTO DE CUENCA SEDIMENTARIA

Son extensos acuíferos muy profundos ubicados en cuencas sedimentarias. Aunque el gradiente geotérmico sea normal (0,03 °C/m), su interés radica en la presencia de una formación de elevada porosidad y permeabilidad situada a gran profundidad. Este gradiente significa que a 2Km de profundidad la temperatura es

menor de 60 °C. Evidentemente no se trata de agua capaz de producir electricidad , pero se puede utilizar para calefacción y fines industriales.

En general, en este tipo de yacimientos, el agua caliente transmite calor al agua de un circuito secundario de distribución de calor y después se inyecta al acuífero a una temperatura de 15 °C. Se utilizan como en los yacimientos de agua caliente un pozo de producción y uno de reinyección, y la distancia entre pozos suele ser aproximadamente de 1 km.

Uno de los ejemplos más conocidos es la cuenca de París en Francia, en la que se utiliza el calor para la calefacción de los hogares y suministro de agua caliente a núcleos residenciales. La potencia instalada es de 295 MW y la producción anual de 4434 kW, con un caudal promedio de 100 m³/h una temperatura entre 58 y 83 °C .

3.4 YACIMIENTO GEOPRESURIZADO

Es un caso especial de almacén geotérmico en cuenca sedimentaria cuando el agua contenida en el acuífero está sometida a grandes presiones. Aunque puedan estar en contextos de cualquier edad, se encuentran generalmente en rocas de edad mezoica (menos de 200 millones de años) y cenozoica (menos de 60 millones de años). Estos yacimientos aparecen en áreas de gradiente geotérmico normal (no más de 0,03 °C/m), pero se encuentran a profundidades de 6 km o más y por tanto a temperaturas superiores a 150 °C. La principal característica es que los acuíferos contienen agua (que puede ser congénita) caliente, a presiones entre el 40% y el 90% superiores a la presión hidrostática que corresponde a la profundidad a la que se encuentra.

La sobrepresión es debida a diferentes causas, tal como la ocasionada por la carga debida a la potente sedimentación compacta la formación permeable. La presión del agua puede aumentar considerablemente si existe una formación impermeable por encima que impida su migración. El agua contribuirá a soportar parcialmente la carga del peso del material superior y evitará así la compactación total del acuífero. La presión de los pozos es entonces intermedia entre la presión hidrostática y litostática. Un claro ejemplo es en el golfo de México de 4,9 km de profundidad y tenía una presión en el techo del acuífero de 871 bar, dado que el cabezal del pozo estaba a una presión de 439 bar, representa un exceso de 95% del valor hidrostático.

Estos yacimientos pueden producir también energía hidráulica aprovechando este exceso de presión para mover una turbina. Los yacimientos geopresurizados llevan asociados tres tipos de energía: la geotérmica, la hidráulica debido a la elevada presión y la química por el elevado contenido de gas metano que llevan habitualmente asociados. Muchos de estos acuíferos se descubren por casualidad en la exploración petrolífera rutinaria.

3.5 YACIMIENTOS DE ROCA CALIENTE SECA



Está formado por rocas impermeables sin contenido de agua pero que se encuentran a una temperatura elevada. En determinadas circunstancias pueden realizarse fracturas mediante fracturación hidráulica o mediante explosivos y se inyecta agua, procurando que alcance la mayor superficie posible de roca caliente. Cuando ya existe un cierto grado de permeabilidad natural se denomina yacimientos de roca caliente húmeda (HWR).

En general , el origen de estos yacimientos está asociado a: una intrusión magmática en áreas volcánicas, generalmente con un volcanismo ácido; una zona de fuerte adelgazamiento litosférico con formación de estructuras tipo graben y a un Plutón de elevada generación de calor por desintegración de isótopos radioactivos.

Un claro ejemplo es el de Rosemanowes (Reino Unido) el yacimiento se sitúa en un gran batolito granítico. El calor se estima que proviene exclusivamente de la desintegración de isótopos radioactivos contenido en el granito.

Este apartado se adelanta que se explicará en mayor extensión ya que uno de los objetos de trabajo es el empleo del EGS para obtener el fluido a la temperatura requerida y presión.



4. TECNOLOGÍA EGS

El *EGS* (Enhanced geothermal system) son las siglas que designan los sistemas geotérmicos estimulados. Como podemos ver a lo largo del trabajo podemos apreciar que todos los sistemas geotérmicos necesitan de un acuífero para poder obtener energía. Sin embargo existen yacimientos de potencial geotérmico que no tiene en su interior un fluido, y por tanto se desecha. Por eso surgió el planteamiento de la *EGS*, que se basa en la idea de introducir un fluido en un yacimiento que nosotros creamos. Esto posibilita la creación de yacimientos geotérmicos en cualquier lugar que se desechase anteriormente por carecer de fluido.

En este apartado se explicará rasgos que se deben tener en cuenta en un yacimiento geotérmico de este estilo, secuencia de estimulación y las diferentes formas de estimulación para provocar fracturas en las rocas.

4.1 DEFINICIÓN

La *EGS* son sistemas geotérmicos con reservorios artificiales. Se basan En la recuperación de la energía térmica contenida en las rocas del subsuelo mediante creación o acceso a un sistema de fracturas abiertas, conectadas entre sí. De tal forma que el fluido se inyecte en las fracturas, el fluido en contacto con las rocas calientes aumente de temperatura y por condiciones del yacimiento consiga que aumente también su presión. Al tener un fluido a alta temperatura se busca devolverlo a la superficie para la producción en la turbina de energía eléctrica.

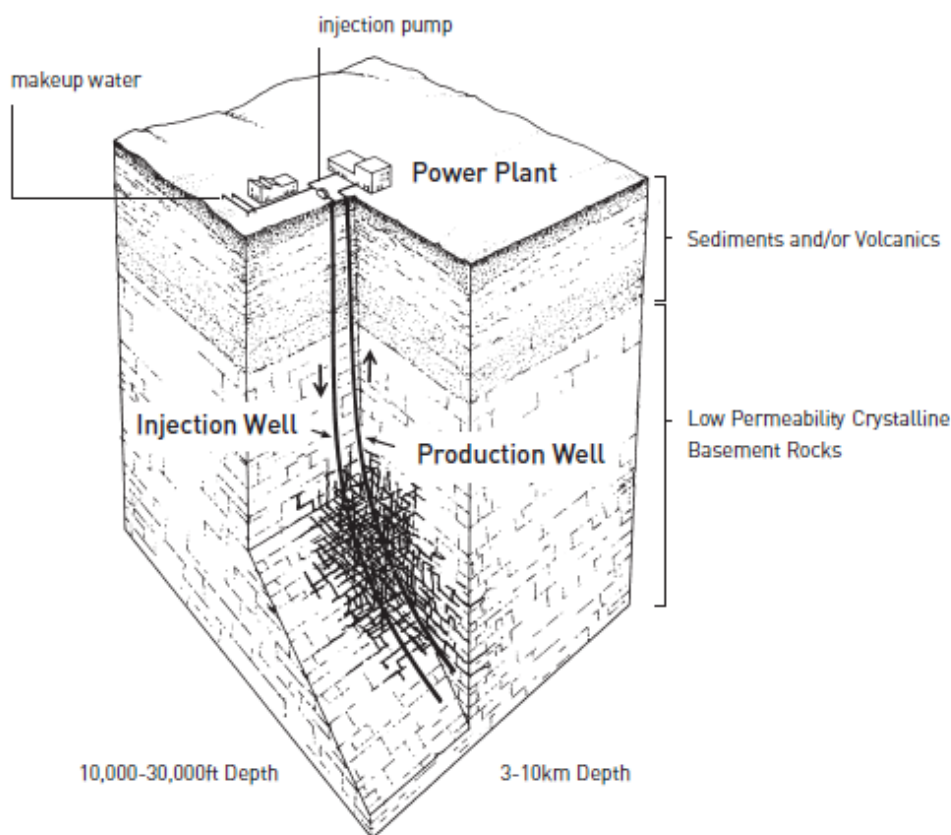


Figura 6. Representación de yacimiento EGS [7]

4.2 PARÁMETROS PRINCIPALES DEL YACIMIENTO

En la EGS es importante mediante sondeos del terreno determinar la profundidad del terreno para determinar la temperatura del yacimiento, el volumen de roca fracturada, espacio entre fracturas, área superficial de la fractura, profundidad de capa de sedimentos y conductividad térmica.

4.2.1 TEMPERATURA DEL YACIMIENTO

En un yacimiento geotérmico es muy importante determinar la temperatura a la que puede estar el fluido geotérmico, por eso se han diseñado modelos matemáticos que estimen el poder calorífico de un yacimiento geotérmico.

En función de las rocas sedimentarias del terreno de estudio se halla su temperatura.

$$T_s = \frac{Q_0 \cdot X_s}{K_s} - A_s \cdot \frac{X_s^2}{K_s}$$

A_s = Calor geotérmico debido a radioactividad en roca sedimentaria. Aprox. = $1 \mu\text{W}/\text{m}^3$

Q_0 =Flujo de calor medido en roca sedimentaria.

K_s =Conductividad térmica de la roca sedimentaria.

X_s =Espesor de la roca sedimentaria.

T_s =Temperatura de la roca sedimentaria

A partir de la temperatura de la roca de basamento (roca a partir del paleozoico, que carece de interés en geotermia, pero ocupa o interfiere en el espacio de nuestro potencial yacimiento)

$$T_b = \frac{Q_m \cdot X_b}{K_b} - A_b \cdot r^2 \cdot \frac{1 - e^{-\frac{X_b}{r}}}{K_b}$$

Q_m =Calor geotérmico del manto

X_b =Espesor de la roca de basamento.

K_b = Conductividad térmica de la roca de basamento,

A_b = Calor geotérmico debido a radioactividad en roca basamento

r =variable de radioactividad según la profundidad.

Con la temperatura de basamento y de la roca sedimentaria obtenemos que

$$T_{final} = T_s + T_b + T_0$$

T_{final} =Temperatura del yacimiento geotérmico.

T_0 =Temperatura del suelo a nivel superficial (aprox. 16°C)

Por tanto, la estimación del calor del yacimiento se termina por:

$$Q_{yacimiento} = \rho_{roca} \cdot C_p \cdot V \cdot (T_{final} - T_0)$$

$Q_{yacimiento}$ =calor producido por el yacimiento

C_p = capacidad calorífica del yacimiento.

V = Volumen de roca efectiva para la producción de calor.

Otra fuente como el IDAE afirma que una forma de calcular la temperatura del yacimiento sería:

$$R = 0,33 \cdot \frac{T_t - T_i}{T_t - T_0}$$

R =Factor de recuperación.

T_t =Temperatura de producción.



T_i = Temperatura de inyección.

Esta última expresión se basa en el ritmo de extracción depende fundamentalmente de la diferencia entre la temperatura de la roca y la temperatura del agua circulante por la roca. Por transmisión de calor elemental, cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será el ritmo de extracción.

Ahora bien, la cuestión reside en cuánta ha de ser la diferencia para maximizar la extracción económicamente. Por otra parte, si el agua circula y no se calienta lo suficiente, el proyecto no alcanzará las condiciones de diseño esperadas. Por otra parte, de no observar un descenso en la temperatura del fluido extraído a lo largo del tiempo, se debe concluir que el flujo utilizado no es suficientemente alto para extraer el calor de una forma lo más eficiente posible.

Para un yacimiento EGS, la tasa de extracción de calor es el producto de flujo másico circulado y la diferencia de entalpía específica entre el fluido inyectado y el producido. Encontrar el equilibrio es complejo porque si el flujo másico se incrementase en exceso, tanto la temperatura del fluido producido como la diferencia de entalpías descenderá, alejándose la tasa de extracción de energía térmica de su punto de máxima eficiencia.

Además de la dificultad de hallar este punto de equilibrio, se debe tener en cuenta que los equipamientos de las centrales de producción no se pueden adaptar totalmente a los cambios que se quieran realizar en la tasa de producción. Las plantas están diseñadas para una serie de condiciones específicas, que se deben mantener para su correcta utilización de su eficiencia máxima de producción. Evidentemente, esto implica la existencia de un límite inferior a partir del cual la producción económica no será posible, y a esta temperatura se la conoce como temperatura abandonada de yacimiento.

El descenso térmico que ocurre de forma natural en un yacimiento puede variar con el tiempo. De acelerarse demasiado, la estrategia a seguir es la misma que en pozos hidrotermales: se cavan nuevos pozos para aprovechar partes del yacimiento aún no utilizadas y frenar la caída térmica en la zona original.

En un yacimiento EGS la mayor parte de este descenso de temperatura ocurre, como es lógico, alrededor del pozo de inyección, donde la temperatura del fluido es menor.

4.2.2 VOLUMEN DE LA ROCA FRACTURADA

A pesar de que la roca es un excelente almacén térmico, la tecnología actual no permite una tasa de extracción excepcional, ni mucho menos. Además, únicamente la fracción del volumen de la roca accesible mediante las fracturas creadas durante la estimulación se puede considerar útil.

Estudios como los de *Sanyal* y *Butter*, concluyeron que el parámetro más determinante para calcular los recursos extraíbles de la roca es el volumen fracturado. Probablemente el dato más importante de este estudio sea que la potencia eléctrica neta extraíble de un volumen de roca fracturada es aproximadamente $0,026 W_{elec}/m^3$. Lo relevante es que el factor se cumple para diversas configuraciones, tipos de fractura y permeabilidad, y parece mantenerse constante con una variación del 5%.

La distribución geométrica de la producción influye en gran medida la cantidad de roca que se puede estimular, y por tanto es responsable primaria de los números de producción de calor. También hay que considerar el tipo de estrés de la roca, que determinará la forma de las fracturas. Y esto a su vez dependerá del tipo de roca y demás. Como se puede observar, no es el procedimiento establecido y consta de una amplia variabilidad, de ahí la inseguridad en las estimaciones de este tipo, al menos hoy en día.

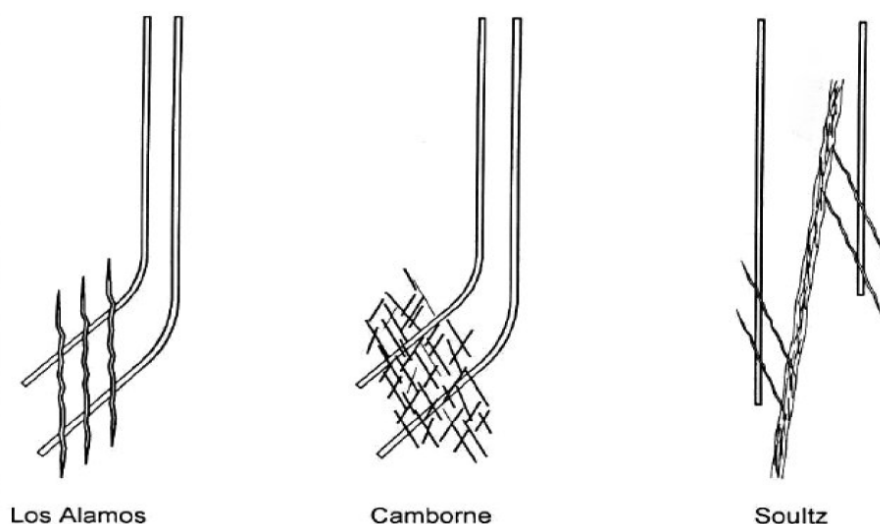


Figura 7 configuración de fracturas de distintos tipos en una estimulación en doblete en los Alamos, Camborne y Soultz [7]

4.2.3 ESPACIADO DE LAS FRACTURAS

A pesar de que el volumen de roca fracturada es el factor principal, un espaciado adecuado entre las fracturas es imprescindible para una extracción eficiente.

Sanyal y *Butter* determinaron que su impacto en la extracción era muy relevante ya que tiene un gran papel en la determinación del volumen activo del yacimiento. Tras investigaciones con espaciados entre 3 y 300m, llegaron a las siguientes conclusiones:

- Para espaciado razonables y realmente alcanzables de entre 3 y 30m, la interferencia térmica es baja o nula.

- Entre 3 y 30m, la diferencia en cuanto a calor extraíble es irrelevante.
- A partir de 30m de separación, se observa un descenso de la eficiencia de extracción térmica. Para una misma configuración de cuatro pozos productores por inyector:
 - Con el espaciado de 300m la eficiencia era de 2,2%, al flujo máximo posible.
 - Con un espaciado de 30,5m. para el mismo flujo, el rendimiento fue de 29,4%
 - Descendiendo el flujo, hasta el nivel óptimo, el porcentaje sube hasta el 42,5%, siempre manteniendo la máxima vida útil del yacimiento.

Para estos cálculos, se asumió un espaciado y distribución homogénea, y éste no va a ser el caso de en la práctica. Pero la máxima aproximación a esta situación es uno de los principales desafíos ingenieriles que se presentan en el campo de la geotermia estimulada.

4.2.3 SUPERFICIE DE LAS FRACTURAS

Un yacimiento estimulado geotérmicamente funciona como un gran intercambiador de calor subterráneo. Evidentemente y como para todo intercambiador, la tasa de transmisión de calor dependerá del flujo másico del fluido, y de la superficie de contacto roca-fluido.

- El espaciado de los pozos controla la longitud de las fracturas, lo cual es un factor determinante en la circulación del fluido.
- Espaciado de las fracturas, para un mismo volumen, a más fracturas, mayor superficie de contacto.
- Longitud y anchura de las fracturas. La longitud está relacionada, pero no necesariamente determinada por el espaciado entre los pozos, ya que será extraordinario que recorra una línea recta. La anchura deberá ser proporcional al área de contacto.
- Configuración de los pozos. El posicionamiento de los pozos de producción en relación con el inyector. La altura de las fracturas son altamente circuladas es controlada de cierta manera por esta geometría de distribución.

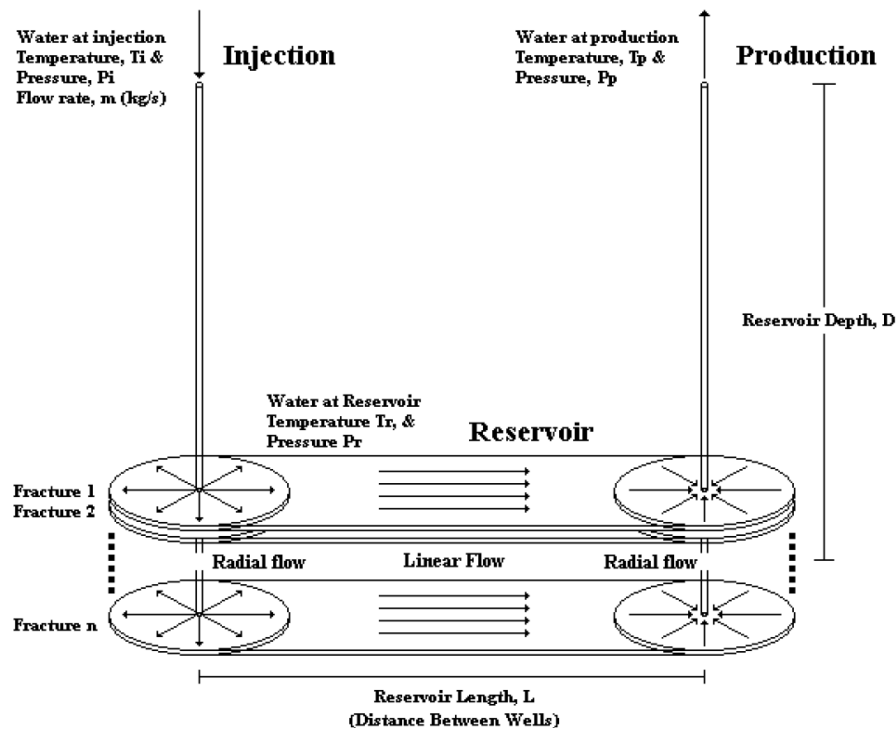


Figura 8. Representación esquemática de los factores a tener en cuenta al implanta un sistema EGS [7]

4.2.4 PROFUNDIDAD DE LA CAPA DE SEDIMENTOS

Es el aislamiento perfecto que permite que el yacimiento conserve sus alta temperatura, gracias a su baja conductividad térmica. Para un yacimiento EGS de buenas propiedades, un valor adecuado de grosor ronda los 4 km.

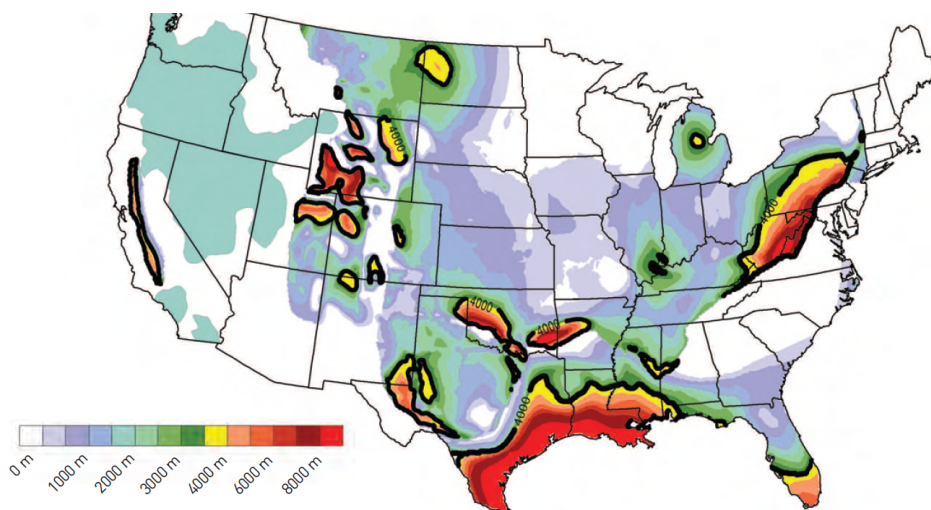


Figura 9. Mapa de EEUU que muestra la anchura de capa de sedimento [7]

4.2.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Es la propiedad de los materiales que determina sus capacidad para la transferencia de calor. Es lógico, que una roca que sea capaz de conducir el calor en una tasa elevada no significa que su flujo térmico vaya a ser elevado necesariamente, pero este parámetro si podría constituir un límite superior para la transmisión de calorífica. Esto será muy importante en el caso de las capas de sedimentos que aíslan los yacimientos de roca caliente.

En el caso de los yacimientos HDR (hot dry rock) ideal debe estar constituido de forma que una capa de roca caliente de alta conductividad térmica (granito por ejemplo) este situada bajo otra con una conductividad reducida que la aisle, y así mantenga el calor confinado. De no existir esta segunda capa, la elevada conductividad de la roca caliente haría que perdiese temperatura rápidamente.

Para el cálculo de la temperatura, la conductividad vertical de la roca se ordena en función de la profundidad, en un modelo por capas. De esta manera, a cada capa de roca le corresponderá un valor determinado de conductividad (en $W/m \cdot K$) en función de sus propiedades físicas.

4.3 ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA

Este procedimiento se basa en la propagación o creación de fracturas en una masa rocosa, como resultado de la acción de un fluido a altas presiones. Es un método utilizado tanto en pozos geotérmicos como en pozos para extracción de petróleo y gas natural.

Existen dos maneras de obtener una red de fracturas que permitan una extracción de calor en un yacimiento de roca caliente seca: la primera es la fractura activa de la roca mediante inyección hidráulica, y la segunda es la estimación de fracturas existentes, pero que no permiten la circulación de fluido con un volumen suficiente como para poder ser económicamente viable su explotación.

Este modo de estimular la roca será apropiado o no en función del tipo de tensiones que se acumulan en la roca en estimular. Ya que en la década de los 80 se concluyó a través de distintos estudios, que los esfuerzos cortantes y no los de tracción son dominantes. Las fracturas existentes que estén alineadas con las direcciones principales de tensión fallarán por cizallamiento, por esfuerzo cortante. Como consecuencia de este tipo de formaciones serán candidatos válidos para estimulación hidráulica.

Es evidente que el conocimiento sobre el estado tensional de la roca es de gran importancia para entender e incluso predecir el comportamiento de la roca durante la estimulación.

La estimulación hidráulica ha ido evolucionando a lo largo de los años. Un concepto interesante que apareció durante la década de los 70 para estimular la roca mediante inyección del fluido a diferentes alturas del pozo todavía no se ha llevado a cabo satisfactoriamente por dificultades técnicas. Para solventar el problema del descenso térmico (bajada en la temperatura de la roca del yacimiento por unidad de tiempo, sujeto a la circulación de agua en ciclo cerrado), este concepto de estimulaciones paralelas evolucionó hacia la estimulación completa de la roca. Detrás de esta idea están las siguientes razones:

- Aumento de la microseismicidad inducida cuando se estimulan secciones concretas de gran densidad y permeabilidad baja (paked-off zones), y que se evitaría estimulando ciertas secciones en concreto.
- La escasa conexión hidráulica entre segmentos adyacentes, y la aparente falta de superposición de eventos sísmicos.
- La posibilidad de utilizar los resultados de cada pequeña estimulación, para la creación de un yacimiento uniforme.
- Aumento de los recursos técnicos que harían posible una estimulación de este tipo.

El concepto de múltiples segmentos era atractivo a priori, pero era y es difícil implementarlo porque cada segmento ha de ser estimulado, circulado, y probado de forma aislada al resto, sin flujos cruzados. Alcanzar una separación hidráulica entre segmentos representa un desafío importante. De no cumplirse este aislamiento hidráulico, podrían producirse cortocircuitos, que podrían reducir la eficiencia del yacimiento. La estimulación de zonas separadas a gran profundidad y temperatura requiere un desarrollo tecnológico significativo. El desarrollo de empaquetadores (drill packers, dispositivo que se introduce en un pozo con un diámetro ligeramente menos y que se expande externamente para sellarlo) in fiables y que soportan altas temperaturas puede suponer un avance importante en este aspecto.

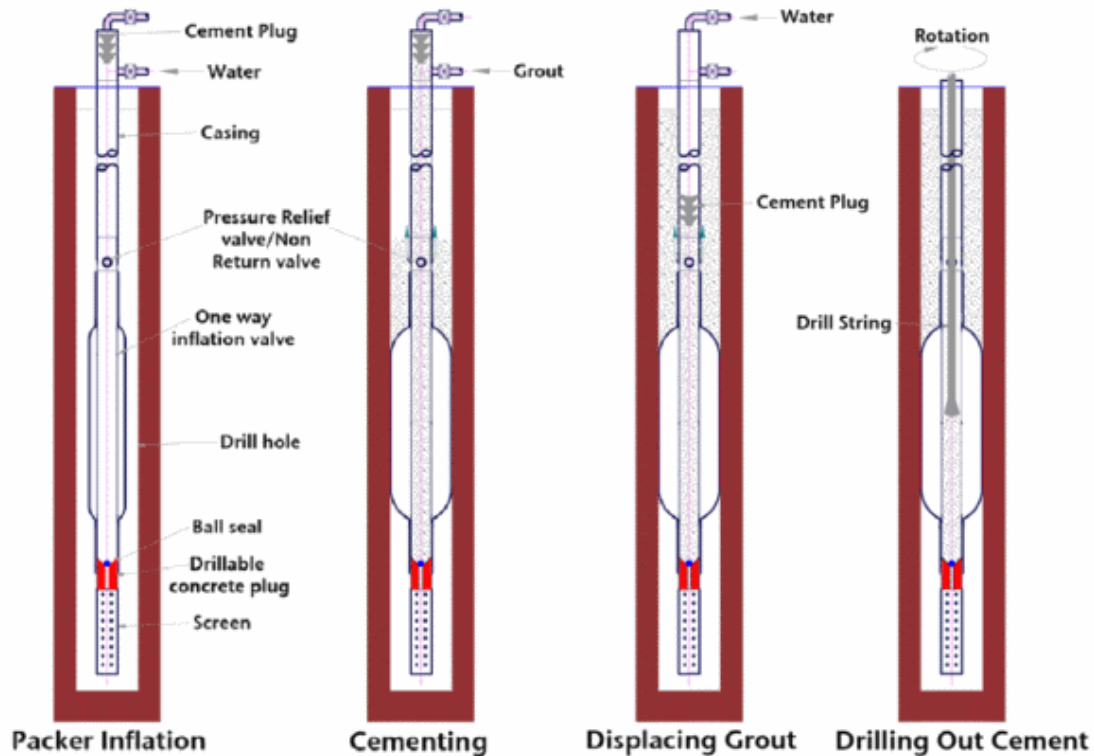


Figura 10. Representación de "Drill Paker"

La estimulación hidráulica ha resultado efectiva en las tareas de vencer dificultades en una zona específica del yacimiento, o para crear uno que sea viable económicamente. La formación de nuevos yacimientos, a día de hoy, requiere centrarse en roca con fracturas existentes, y que presente predisposición a rotura por cizallado debido a las tensiones soportadas.

A grandes rasgos y hoy en día, los pasos a seguir para la creación de un nuevo yacimiento son los siguientes (se parte del momento en que el pozo está perforado hasta la profundidad deseada)

- 1) Caracterizar la roca de alrededor del pozo en la zona a estimular (campo de tensiones, tipo de uniones, fluidos existentes, propiedades mecánicas de la roca, identificación de zonas que permitan la circulación del fluido, etc).
- 2) Identificar las posiciones idóneas para colocar geófonos que permitan mapear el origen de los microsismos producidos, no sólo por el proceso de estimulación, si no también durante la vida útil del yacimiento.

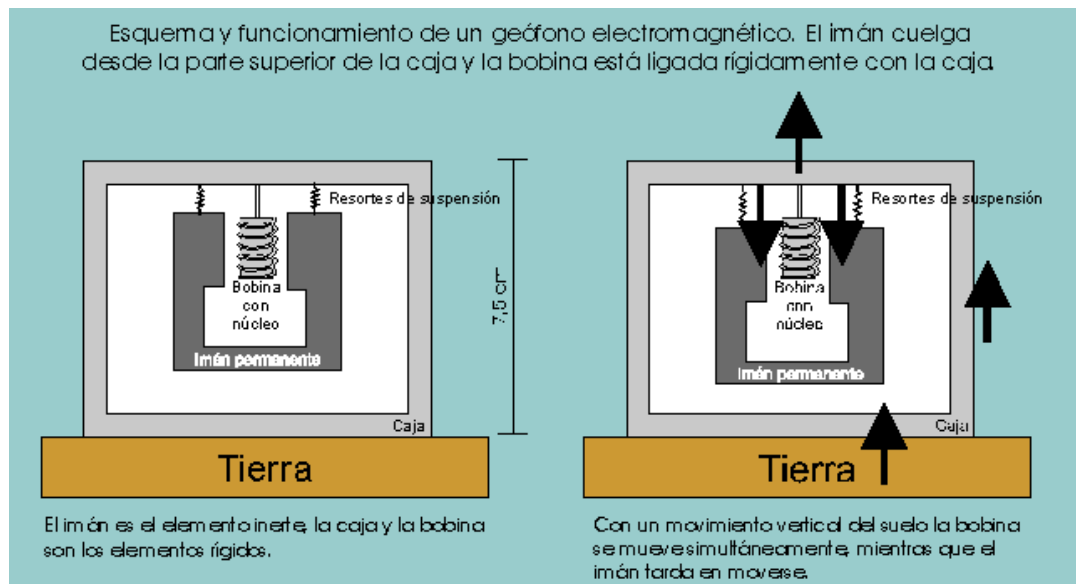


Figura 11. Esquema de funcionamiento de un geófono [13]

- 3) Llevar a cabo inyecciones escalonadas hasta que se estabilice la presión. La presión máxima de inyección debe superar la mínima tensión de formación en el punto de inyección.
- 4) Mantener la inyección a alta presión hasta que el origen de los microsismos inducidos alcance la distancia necesaria para la colocación de los pozos de extracción.
- 5) En función de la relación entre las tensiones existentes y la densidad del fluido, es posible dirigir (hasta cierto punto) el crecimiento vertical del yacimiento, jugando con la densidad del fluido de inyección.
- 6) Hacer un *shut-in* test para comprobar las dimensiones del yacimiento.
- 7) Realizar un test del flujo en pozo de inyección para determinar las zonas principales de flujo.
- 8) Descender la presión en el yacimiento y mantener la inyección a niveles más bajos para convertir en permanente la mejora de la permeabilidad conseguida en las etapas anteriores.
- 9) Perforar el pozo de producción en la periferia de la zona estimulada, a una separación que sea adecuada para la rentabilidad económica de la extracción.
- 10) Estimular el pozo de producción de la misma manera que el de inyección, para mejorar las conexiones con la zona previamente estimulada.
- 11) Llevar a cabo test de conexión entre los pozos de inyección y producción.
- 12) Evaluar la capacidad de circulación de fluido total, de cara a iniciar la extracción energética, e identificar posibles cortocircuitos.
- 13) En caso de existir sucesivos pozos de extracción, repetir los pasos 10 a 14 para cada uno.

Es lógico, que los pasos arriba enumerados componen una descripción bastante simplificada de lo que en realidad es la estimulación del pozo. Como es lógico, cada

localización determinada contará con una serie de características únicas que habrá que tener en cuenta a la hora de realizar este proceso.

La estimulación a varias alturas ha sido un desafío desde los inicios de la investigación en EGS, ya que la fracturación teórica descrita en diversos estudios es inviable con estimulación a un solo nivel. Una tecnología recientemente presentada por la empresa Altarock Energy, el TZIM (Thermo-degradable Zonal Isolation Materials) podría suponer un gran avance en este aspecto.

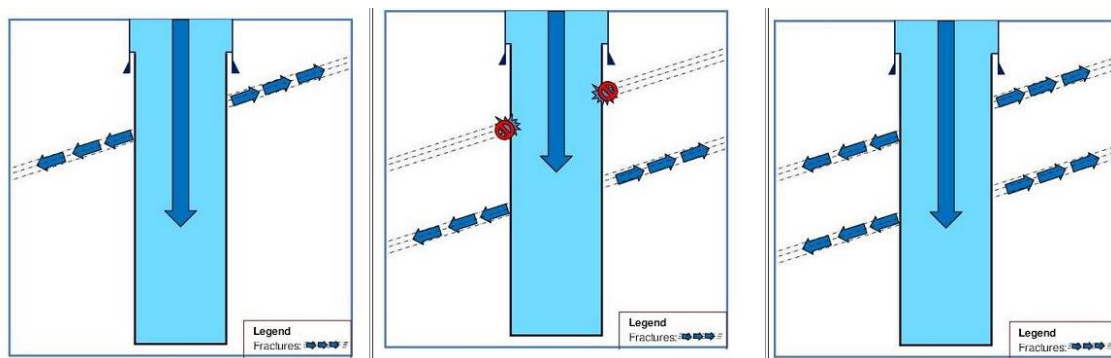


Figura 12. Tecnología de EGS a varias alturas [7]

Esta tecnología presenta un atractivo a las demás por las siguientes razones:

- Se inyecta un fluido
- La densidad del fluido debe ser neutra, por tanto está circulando un fluido principal.
- Las partículas por el movimiento y por el yacimiento se depositan sobre las paredes del pozo.
- El material que se ha depositado sobre las paredes genera fracturas. Los materiales de las paredes se degradan por la temperatura, permitiendo la circulación gradual de fluido a distintas alturas /fracturas.

La circulación a través de la pared del pozo es monitorizada y tiene la gran ventaja de que no requiere torres de perforación durante el proceso.

4.4 PROBLEMAS DE LA ESTIMULACIÓN HIDRAÚLICA

Se han dado numerosos casos de sismicidad inducida a partir de programas de estimulación hidráulica en pozos geotérmicos, pero es verdad que existen determinadas formaciones de roca que son más propensas a producir eventos de esta clase.

La gran mayoría de eventos de este tipo han tenido lugar en formaciones de roca muy dura. Esto se explica por la baja permeabilidad de este tipo de roca: la poca que existe se da a través de las fracturas existentes, y es a través de esta red de fracturas por donde se propaga y se libera la tensión acumulada al estimular la zona. En el caso de sedimentos más porosos, las tensiones no se liberarán a través de las

fracturas como en el caso anterior, si no que se difundirán a través del volumen total de roca de una manera más uniforme, reduciendo la intensidad de los seísmos inducidos.

Controlar el crecimiento del yacimiento a medida que se realiza la estimulación y la circulación de fluido es un asunto de gran importancia para todos los proyectos llevados a cabo en una roca de baja permeabilidad. La monitorización de los microsismos permite la creación de un mapa 3D de sus orígenes y magnitudes, del cual se puede simular un mapa de las fracturas presentes en la roca. Esta técnica, mediante diversos algoritmos, se ha convertido en la herramienta principal para realizar el mapa del yacimiento de proyectos recientes en HDR, como Soultz en Francia, y Cooper Basin en Australia. La localización de las fracturas producidas por la estimulación es clave para determinar la localización de los pozos de extracción, y lo que es más importante, puede ayudar a la predicción de eventos sísmicos mayores que podrían llegar a evitarse.

Debido a esto se han estudiado existen más forma de estimulación de la roca

4.5 ESTIMULACIÓN TÉRMICA

Esta estimulación se basa en la fracturación de roca gracias a cambios bruscos de temperatura, que provocan grandes esfuerzos en el yacimiento, y hacen que la roca quiebre. Se da en formaciones de condiciones muy concretas, como se explicará a continuación.

Los procesos de estimulación comienzan normalmente con la circulación de agua a través de la sonda de perforación, seguida de la inyección de agua a temperaturas bajas en el pozo, a unos niveles de presión que pueden ser muy elevados. Este proceso se lleva a cabo en intervalos, con tiempos intermedios de actividad nula, en los que se permite que el yacimiento recupere su temperatura habitual gracias al calor de la roca circundante. Una vez que la temperatura se normaliza, se inicia de nuevo la inyección de fluido frío. De esta manera, los cambios de presión y temperatura continuados conllevan un gran esfuerzo de fatiga en la roca que permite la creación de nuevas fracturas o la apertura de las existentes.

La manera ideal de monitorizar estimulaciones térmicas como estas consiste en contar con una combinación de sensores de presión, flujo y temperatura en la boca del pozo; además de imágenes térmicas e información sobre presiones en las profundidades a estimular. De esta manera, los efectos de la estimulación se combinan con información sobre la fracturación conseguida.

4.6 ESTIMULACIÓN QUÍMICA

Que un yacimiento geotérmico sea rentable depende de la precipitación de material en el propio yacimiento (ya sea natural o inducida), ya que de esta forma alteramos la permeabilidad del mismo. Una manera de prevenir la deposición excesiva



de mineral es inyectar un reactivo que disuelva esos minerales indeseados que precipitan en el camino del fluido a través del yacimiento, y que podrían llegar a bloquear fracturas en la roca, disminuyendo el rendimiento total del sistema.

Estos sistemas se han heredado copiado de la industria petrolífera.

4.7 ESTIMULACIÓN POR EXPLOSIVOS Y PROPELENTES

Este tipo de estimulación es la más antigua. El objetivo perseguido es el mismo que en resto de casos, el crear un camino para el fluido y aumentar el rendimiento del sistema.

Existen varios métodos dentro de esta categoría: el primero, las cargas explosivas de forma concreta, y el segundo, el denominado “bore shooting”.

El primer método tiene el inconveniente de su corto alcance, y es aplicable especialmente a casos en los que el objetivo sea conectar puntos de permeabilidad alta, más que a creación de fracturas en sí. Las cargas con formas concretas se han venido utilizando desde mitad de siglo XX, cuando las compañías petrolíferas empezaron a utilizarlas después de la Segunda Guerra Mundial.

El *bore shooting* consiste en contenedores explosivos depositados en la zona a estimular y que al explotar, hacen añicos las formaciones rocosas circundantes. El mayor inconveniente lo comprende la extracción de los escombros producidos. Las fracturas pueden alcanzar una longitud de 13 metros desde el punto origen de la explosión.

Una evolución del bore shooting es la utilización de pulsos de presión de características controladas (amplitud, forma y frecuencia). Se ha demostrado que tienen efectos muy positivos en la estimulación de masa rocosa.

En todos los casos, el uso de propelentes suele ser más atractivo que el de los explosivos tradicionales, ya que sus características incluyen la estabilidad a temperaturas altas, lo cual es muy útil para pozos geotérmicos a grandes profundidades. Además, los propelentes presentan la ventaja de prender a menor velocidad que los explosivos tradicionales, y esto también es un punto positivo ya que aumenta el control que se puede tener sobre la explosión.

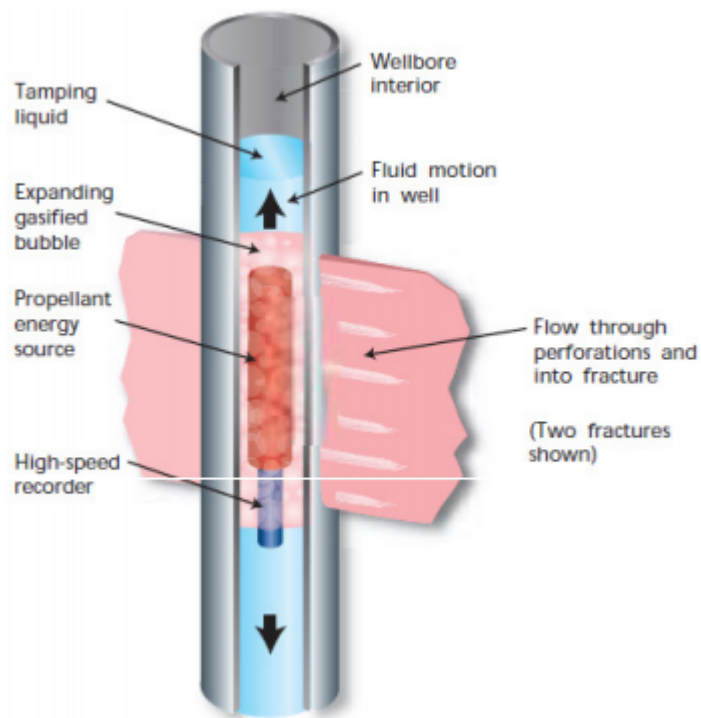


Figura 13. Estimulación por propelentes [7]

5. TIPOS DE CENTRALES GEOTÉRMICAS

Obtener energía eléctrica a partir de la energía geotérmica consiste en crear vapor a presión que mueva una turbina y así transformar la energía cinética a mecánica, por el movimiento de la turbina. El movimiento de la turbina a su vez moverá un generador eléctrico que por el efecto de campos magnéticos en su interior se conseguirá energía eléctrica.

Podremos deducir entonces que las centrales se basan en ciclo Rankine. Los cuales se basan en un fluido calo portador y un circuito cerrado por el que circule. Este ciclo principalmente contiene un elemento que por intercambio de calor aumente la temperatura del fluido, en nuestro caso el yacimiento geotérmico. Deberá seguir una turbina unida al generador de que serán los elementos responsables de la obtención de energía eléctrica. Aguas abajo de la turbina proseguirá un condensador, que por intercambio de calor, se conseguirá disipar el calor del fluido de trabajo y transformar el vapor en líquido. Y por último, se tendrá una bomba que transportará el líquido hasta el yacimiento.

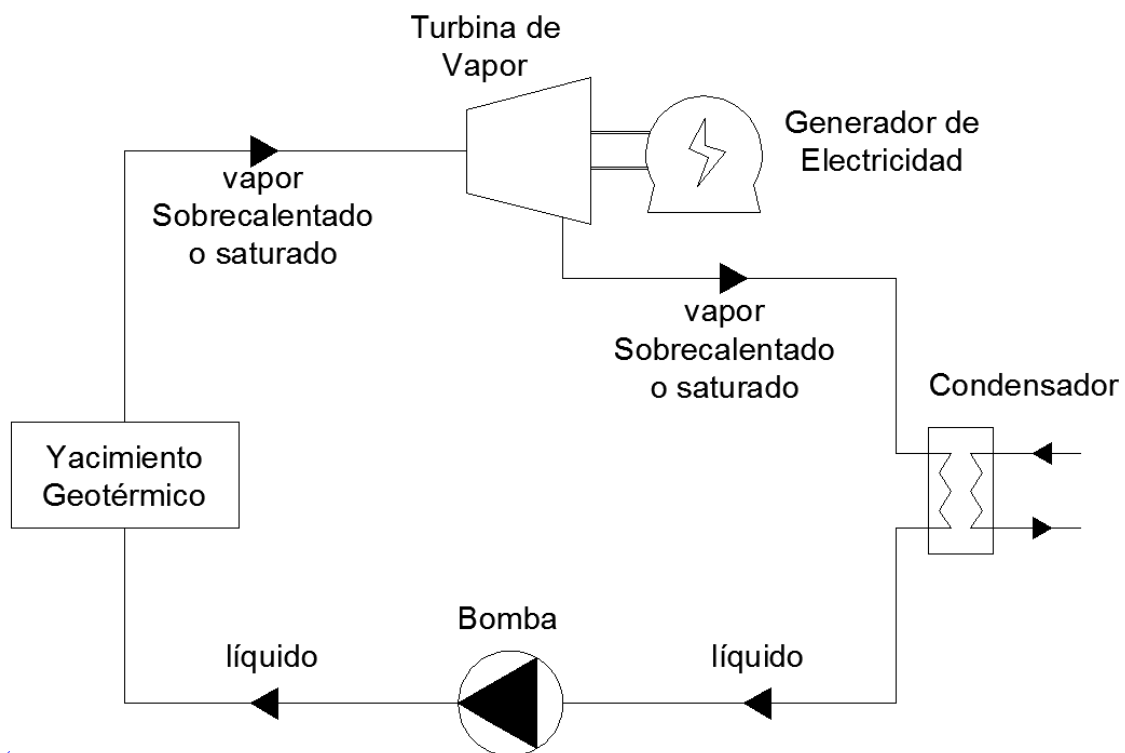


Figura 14. Esquema de una central geotérmica con un Rankine estándar.

Según las posibilidades que nos ofrece el yacimiento Geotérmico:

- Acuífero existente o sin acuífero.
- La profundidad del fluido y espesor del acuífero.
- La calidad del fluido, el caudal y la temperatura.



- La permeabilidad y porosidad de la roca.
- La conductividad térmica y capacidad calorífica del acuífero y de las rocas circundantes.

La forma de determinar todos estos parámetros son mediante sondeos de los que hemos hablado.

Para que exista una producción continua el caudal de fluido debe ser constante, por eso se reinyecta el fluido tras haber pasado el condensador por gravedad o/y con una bomba.

Los fluidos geotérmicos suelen ser principalmente agua por dos razones. Es el líquido más abundante en el planeta y no contamina el ambiente. Sólo que al estar en el subsuelo arrastra sales disueltas y más componentes químicos que fomenta la corrosión de las tuberías y componentes de la central.

En función de estos factores y de las condiciones de presión y temperatura del yacimiento una clasificación de los centrales es esta.

5.1 CENTRALES DE CONVERSIÓN DIRECTA (DIRECT-STEAM)

Cuando un pozo de producción geotérmico suministra vapor en estado de saturación o bien ligeramente recalentado, suele decirse que produce vapor seco; este vapor puede conducirse directamente a la turbina de vapor para generar electricidad. En consecuencia, este tipo de centrales se agrupan dentro del tipo de vapor seco. Suele adoptarse este tipo de central cuando la temperatura es superior a los 200°C.

La figura siguiente presenta un esquema típico, indicando solamente los equipos más importantes.

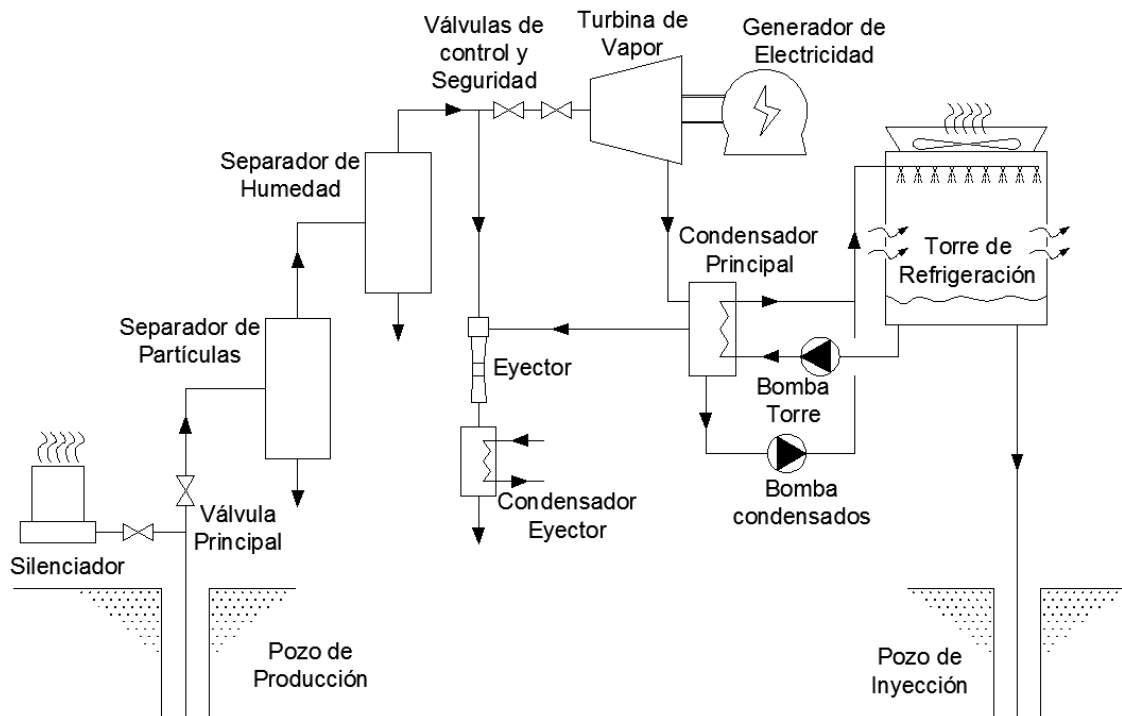


Figura 15. Esquema de una central de conversión directa.

Como elemento común a todas las centrales geotérmicas es la instalación de bocas de producción o pozos, excepto en las de ciclo combinado. Una derivación en T provista de una válvula de corte, que en funcionamiento normal está cerrada, permitiendo derivar en situación extraordinaria el vapor directamente a la atmósfera y otra válvula (llamada válvula principal), que normalmente estará totalmente abierta, permitiendo el paso al resto de la instalación del fluido de trabajo. Si el vapor se descarga directamente a la atmósfera generaría un nivel de ruido superior a los límites autorizados; para amortiguarlo, el vapor de pozo se descarga a la atmósfera a través de un silenciador que reduce la molestia a niveles tolerables.

Debe tenerse en cuenta que el vapor que asciende por la tubería de extracción circula a una velocidad elevada; debido a ello es capaz de arrastrar pequeñas partículas de roca, arena más o menos gruesa, y gotas de agua que deben eliminarse para no dañar el resto de la instalación; a tal fin se instala primero un separador de partículas sólidas y a continuación un separador de gotas, es decir, un separador de humedad.

A continuación, el vapor, limpio y seco, se transporta hasta la central propiamente dicha, mediante tuberías aisladas térmicamente. Si la potencia térmica disponible del pozo es elevada, puede instalarse la central eléctrica justo en la boca del mismo. Si la potencia disponible del pozo es baja y está situado en un campo geotérmico extenso, con la posibilidad de realizar varias perforaciones de extracción, varios pozos pueden alimentar una central única de mayor potencia y, de esta forma, mejorar el comportamiento del sistema.



Cuando varios pozos se alimentan una única central, a pesar de que dicha central se sitúe en el centro de la zona, cubren un área realmente extensa de terreno, con lo cual, en la distancia entre ella y la cabecera de cada uno de los pozos es importante. En este caso debe proveerse la dilatación de los tramos largos de tubería, instalando liras de dilatación o compensadores, y la eliminación del vapor que se condensa, instalando válvulas de purga de condensados (equipos que no se han mostrado en esquema anterior, por no recargarlo y parezca menos claro). Además la tubería que transporta el vapor, desde la boca del pozo hasta la turbina, debe aislarse térmicamente a fin de reducir al máximo las pérdidas por disipación de calor al exterior.

Siguiendo el vapor en su camino hasta la turbina, nos encontramos con una derivación que se dirige a un eyector y una corriente principal que se conduce a la turbina, que se alimenta a través de las válvulas de control y seguridad. La turbina (hoy en día de condensación) arrastra al generador de electricidad y descarga la mezcla de líquido vapor al condensador principal.

Para unas condiciones dadas del vapor a la entrada de la turbina, la potencia generada depende de las condiciones del mismo a la salida, de tal forma que, cuanto mayor será la energía extraída por unidad de masa de vapor turbinado.

Como la presión de saturación es en función de la temperatura de condensación, interesa que este trabaje a la menor temperatura posible y deberá mantenerse esta a baja presión (menor que la atmosférica), mediante una bomba o cualquier otro equipo equivalente. Por ejemplo, si la temperatura de retorno, del agua de la torre de refrigeración es de 35 °C y admitimos un salto de 5 grados entre ella y la mezcla líquido-vapor expulsada de la turbina, la temperatura del condensador será de 40°C y la presión será de 0,074 bar.

Existen medios para mantener esta depresión: eyector de vapor, bomba de vacío, presión hidrostática y recompensación de vapores.

El agua contiene una cantidad sensible de gases disueltos, que puede aceptarse como un 2% en peso, del flujo geotérmico que sale del yacimiento, como valor típico. Estos gases deben eliminarse para asegurar el correcto funcionamiento de la planta y evitar las emisiones a la atmósfera. Téngase en cuenta que el ácido sulfhídrico suele ser un componente habitual y que es altamente venenoso aun en pequeñas concentraciones.

En el esquema de la central de vapor seco, la depresión del condensador se consigue mediante un eyector, que consume parte del vapor procedente del pozo y que descarga a un condensador auxiliar (condensador del Eyector) refrigerado por agua fresca.

Como agua de la torre de de la torre de refrigeración, en las centrales termoeléctricas convencionales, se utiliza agua procedente de algún acuífero cercano. En el caso de centrales geotérmicas, dado que se dispone de agua abundante procedente del pozo (por lo general), toda el agua condensada se lleva a la torre de



refrigeración, una parte se utiliza para refrigerar el condensador y el resto se reinyecta al acuífero; de esta forma se ahorra agua limpia y fresca superficial.

A fin de retardar el agotamiento del recurso geotérmico y evitar la contaminación de las aguas superficiales por vertido de agua geotérmica con alto contenido en sales, se cierra el ciclo devolviendo el agua del acuífero geotérmico, agua que se bombea a través del pozo de inyección, que en algunas publicaciones se denomina pozo de reinyección.

5.2 CENTRALES DE FLASH SIMPLE

Las centrales anteriores aunque tienen un mejor rendimiento en el ciclo, solamente pueden utilizarse en los campos geotérmicos de muy alta entalpía, como por ejemplo los de Larderello (Italia), en los que llega a la superficie vapor seco o casi seco; en la mayoría de los yacimientos de alta o media entalpía, el fluido que llega a la superficie es una mezcla vapor-líquido a una presión que depende del pozo y una temperatura que correspondiente al estado de saturación. Para fijar las ideas podemos aceptar, para el agua en la cabeza del pozo, los siguientes valores típicos (según el IGME) : la presión absoluta suele estar comprendida entre los 5 y 10 bar y el título de la mezcla, entre 0,1 y 0,5. El título nos expresa el contenido de la siguiente fórmula.

$$\text{título de vapor} = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de vapor} + \text{masa de líquido}}$$

En estas condiciones, esta mezcla no puede conducirse directamente a la turbina, puesto que las turbinas convencionales no están diseñadas para trabajar con vapor de tan bajo título: previamente debe separarse el vapor del líquido, la fracción de vapor se conduce a la turbina y la líquida se redestina a otro componente de la central o se rechaza enviándolo al pozo de inyección de agua. Como nos muestra el siguiente esquema.

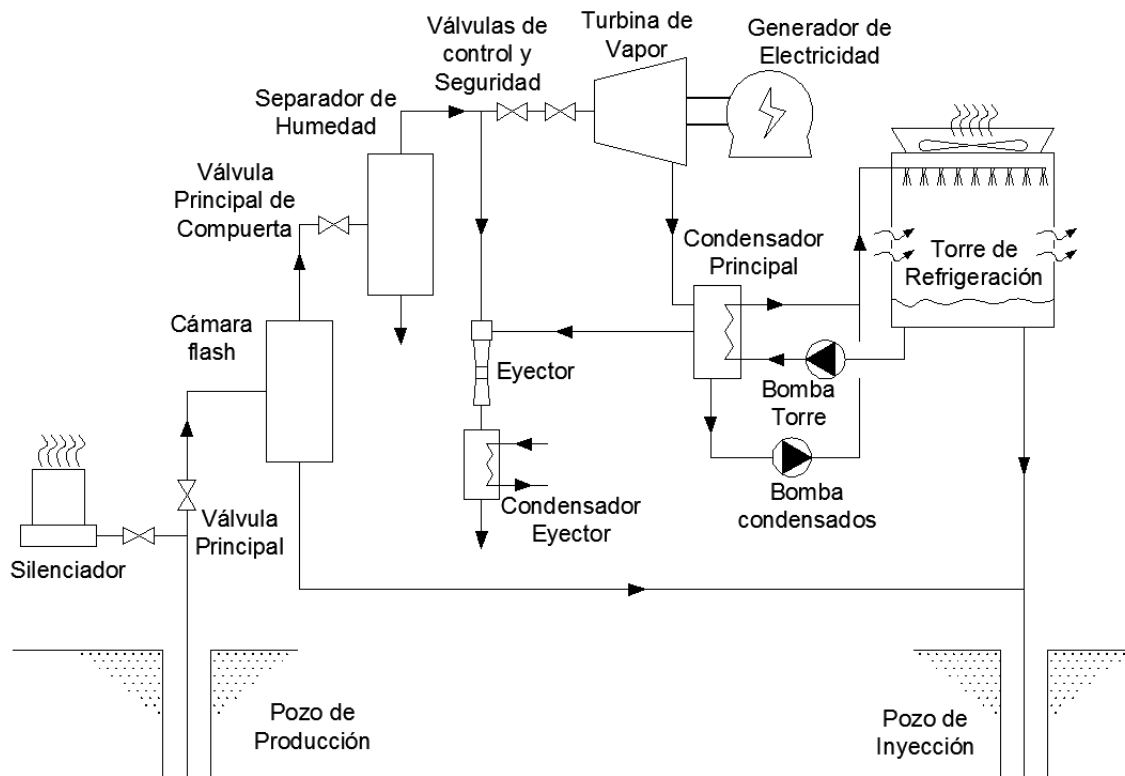


Figura 16. Esquema de una central del tipo Flash

Para efectuar la separación se utiliza un separador ciclónico, designado en el esquema como cámara flash, que aprovecha la diferencia de densidades entre la fracción del líquido y del vapor del fluido bifase y los distingue en dos fluidos. Es decir el vapor se mandará al separador de humedad y el líquido se enviará al ramal de inyección de los pozos de inyección de líquido al yacimiento.

La salvedad en el recorrido de la siguiente central sería la de la colocación de la válvula compuerta entre la cámara flash y el separador de humedad. Esta válvula en estado normal está totalmente abierta. Pero en caso extraordinario si se cierra la válvula de compuerta y la válvula principal todavía no se ha cerrado. que el separador ciclónico enviaría disparará el vapor por una válvula limitadora de presión y el líquido que haya por bypass se mandará a la tubería destinada al pozo de inyección.

Como en la cámara flash se produce una separación, parte del caudal másico entrante se deriva al pozo de inyección y el resto iría de camino a la turbina, lo mismo ocurrirá con la energía. Estableciendo un balance de masa y energía alrededor de dicha cámara, se puede calcular la fracción de energía desviada al pozo de inyección. Tomaremos como base de cálculo que tenemos un kilogramo de mezcla entrante en la cámara flash

$$\text{masa de mezcla entrante} = \text{masa de vapor turbina} + \text{masa de líquido a reinyección}$$

$$1 = x + (1 - x)$$

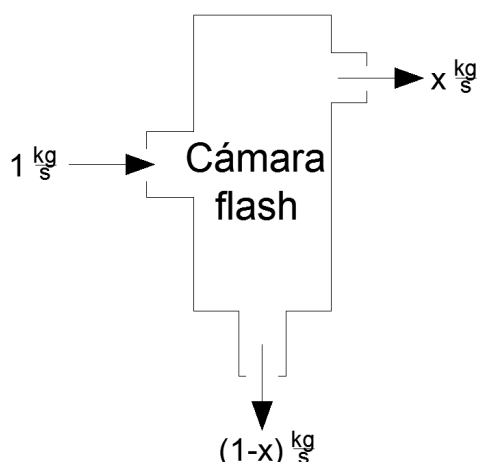


Figura 17. Esquema de la cámara flash de una central geotérmica.

Por ejemplo, si queremos evaluar la entalpía de la mezcla:

$$\text{entalpía mezcla entrante} = \text{entalpía del vapor} + \text{entalpía del líquido}$$

$$h_m = x \cdot h_v + (1 - x) \cdot h_l$$

Siendo

x = Título de de vapor de la mezcla.

h_m = Es la entalpía específica de la mezcla líquido-vapor en las condiciones de la cámara flash.

h_v = Es la entalpía específica de la fase de vapor en las condiciones de la cámara de flash.

h_l = Es la entalpía específica de la fase líquida en las condiciones de la cámara flash.

Este mismo concepto los podemos aplicar para hallar la densidad específica de la mezcla, el caudal de volumen, etc.

El razonamiento seguido explica que, trabajando ambas tipos de centrales (vapor seco y central de simple flash) ambas con el mismo nivel térmico, el consumo unitario de una central de flash sea mucho mayor que el equivalente el de la central de vapor seco.

Si comparamos una central de flash con otra equivalente de vapor seco a igual temperatura y presión, dadas las condiciones habituales, la primera consumirá un caudal másico tres veces superior al de la central de vapor seco.

5.3 CENTRALES DE FLASH DOBLE

Si la presión de la cabecera del pozo es elevada, puede aumentarse la capacidad para generar energía del recurso mediante las centrales de doble flash. En muchos casos, la mejor utilización del recurso geotérmico compensa el coste de elevado de instalación; en el siguiente esquema podemos visualizar una central de este tipo.

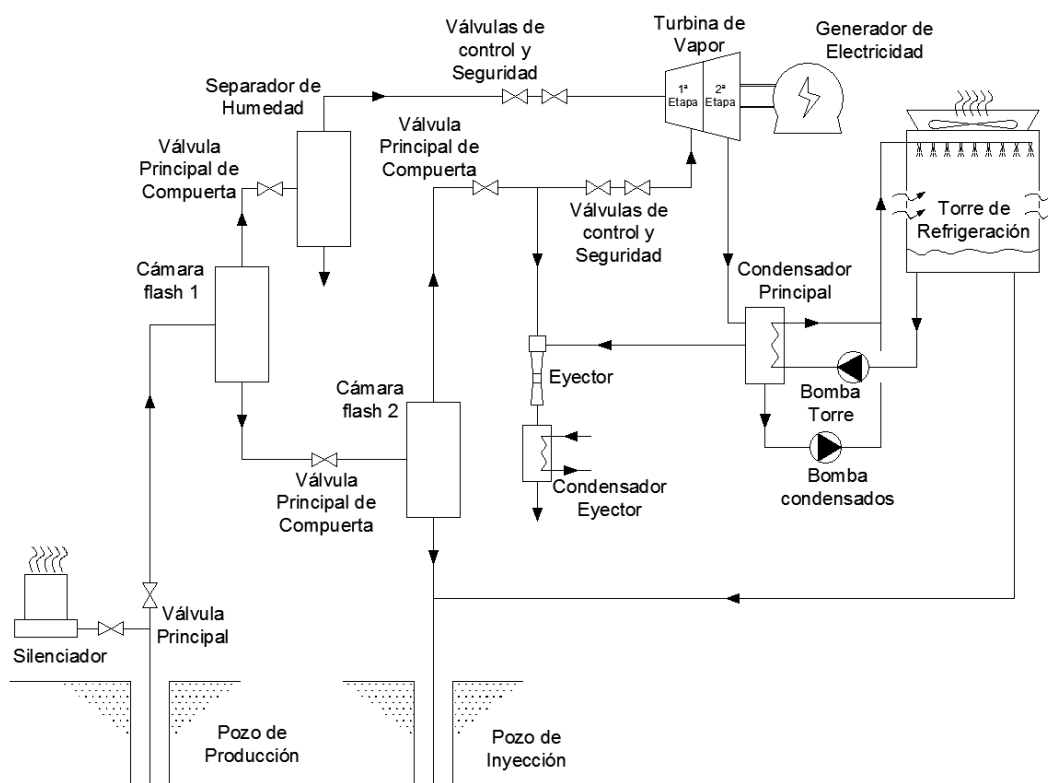


Figura 18. Esquema de una central de flash doble.

Como puede verse, este sistema es muy parecido al anterior con la única salvedad de que, en este caso, se instalan dos cámaras de flash y la turbina es de dos etapas, de esta forma se consigue un mejor aprovechamiento del potencial geotérmico del recurso.

El ciclo trabaja en tres niveles de presión: Presión alta, media y baja. Esto posibilita aumentar el rendimiento de la central y pudiendo sacar una mayor cantidad de vapor del fluido saturado. Este tipo de centrales consiguen aprovechar entre un 15-25% más el fluido geotérmico.

El principio de funcionamiento sería el mismo que el explicado en una central de doble flash, pero como vemos tenemos más válvulas principales de compuerta. Cuando se cierran esas válvulas el separado abre la válvula limitadora de presión y el líquido drenado en el separador se conduciría de nuevo al yacimiento geotérmico.

Como podemos deducir los separadores no tiene una eficiencia de 100% , aunque el rendimiento suele ser mayor del 90%. Pero con la utilización de dos cámaras flash o separadores, conseguimos drenar lo mayor posible el líquido que tenga el fluido bifase. Y así utilizar el mayor vapor posible en el turbinado.

5.4 CENTRALES DE CICLO BINARIO

La posibilidad de extraer energía del recurso geotérmico, utilizando la tecnología explicada en los apartados de central de vapor seco flash simple y doble flash, depende básicamente de la temperatura del yacimiento, puesto que la temperatura del condensador viene fijada por el agua de retorno de la torre de refrigeración. A medida que ambas temperaturas se acercan, la energía extraíble por kg vapor disminuye y este hecho, añadido a las propiedades termodinámicas del agua conduce a que existan unas condiciones a partir de las cuales el sistema deje de ser viable.

Además de esta limitación algunos pozos proporcionan agua con concentraciones de sales tan elevadas y de tal naturaleza, que no puede utilizarse para accionar directamente la turbina debido a riesgos de oxidación, incrustaciones o exceso de gases disueltos; el coste extra que implica su tratamiento hace inviable su utilización.

Para solventar estas dificultades, puede adoptarse la tecnología del ciclo binario, que puede ser viable para recursos geotérmicos por debajo de 150 °C, incluso con altas concentraciones de gases y sales disueltos. Se basa en evitar el uso directo del agua geotérmica y utilizar un fluido de trabajo, distinto del agua, que tenga propiedades termodinámicas más acordes con nuestro aprovechamiento.

En realidad se trata de un ciclo Rankine, en el que el recurso geotérmico (circuito primario) aporta calor al fluido de trabajo del circuito de potencia (circuito secundario), a través de un intercambiador de calor. Es necesario que el fluido calo portador del circuito secundario tenga unos comportamiento termodinámicos que se adapten bien al rango de temperaturas de trabajo, alrededor de los 150 °C para la fuente caliente y alrededor de los 35 °C para el sumidero térmico; los fluidos más utilizados son el propano, n-butano, isobutano, isopentano y el refrigerante R-114.

Aquí se representa el esquema típico de una central Binaria.

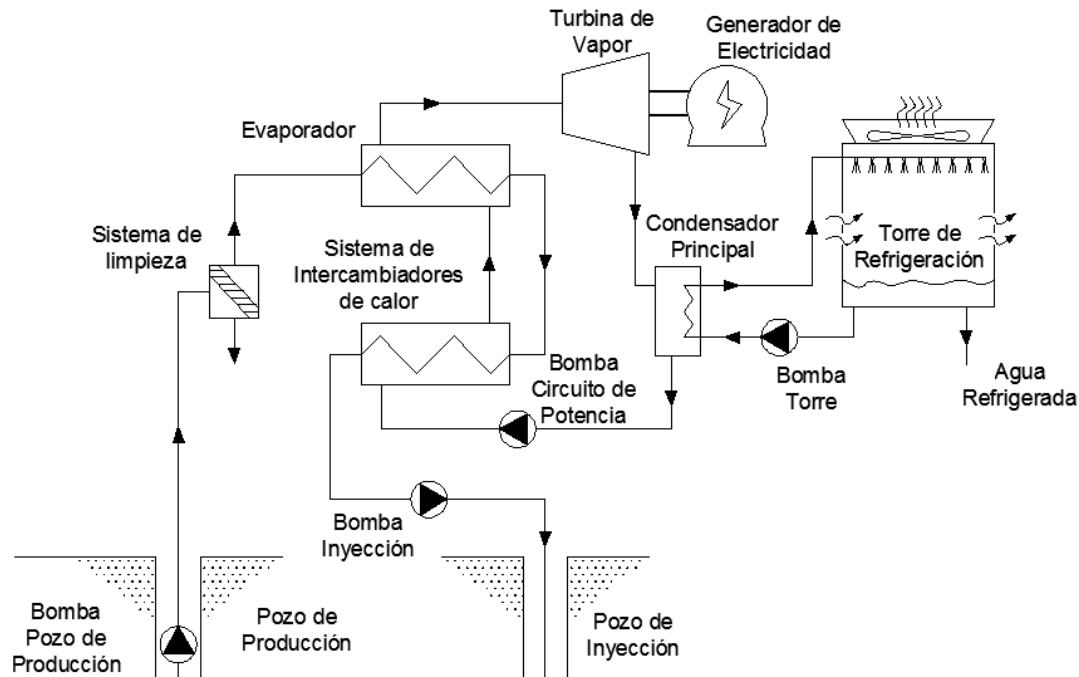


Figura 19. Esquema de una central de Ciclo Binario

representamos una tabla comparativa de la variación de la presión de vapor con distintos refrigerantes.

TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (Bar)				
	Propano	n-Butano	Isobutano	R-114	Agua (saturada)
27	10	2.58	3.74	2.29	0.036
47	16	4.57	6.39	4.13	0.106
67	24.4	7.54	10.2	6.91	0.27
87	35.6	11.7	15.5	11.3	0.63
107	--	17.4	22.5	16.3	1.30
127	--	24.9	31.9	23.6	2.54
147	--	34.9	--	--	4.40
167	--	--	--	--	7.36

*-- Indica que está por encima del punto crítico.

Tabla 1. Presiones del agua saturada a distintas temperaturas y de diferentes sustancias [19]

Del esquema podemos deducir que el agua geotérmica se extrae del pozo mediante la bomba en el pozo de producción. Si la Presión es insuficiente, debe trabajar sumergida a fin de evitar problemas de cavitación. Todo el circuito primario está presurizado, a fin de minimizar la posibilidad de vaporización y separación de gases disueltos y el agua permanece en estado líquido a lo largo de todo el circuito.

Antes de llegar a los intercambiadores de calor el agua pasa por un sistema de limpieza, que consiste en un filtro que elimina la arena y las partículas sólidas. A continuación llega al evaporador, donde cede el calor al fluido de trabajo del circuito secundario. Acto seguido pasa un sistema de intercambiadores de calor y finalmente regresa al yacimiento geotérmico gracias a la bomba de inyección que reinyecta el fluido al recurso geotérmico.

En sentido contrario circula el fluido de trabajo: una bomba de alimentación impulsa el líquido hacia el intercambiador de calor, saliendo a una temperatura próxima a la de saturación, después pasa por el evaporador, donde llega a estado gaseoso y se dirige a la turbina. Por el movimiento del rotor de la turbina se genera la energía mecánica necesaria para arrastrar el Generador eléctrico y conseguir energía eléctrica. El vapor que pasa de la turbina descarga en un condensador principal, donde la fracción que se tiene de vapor condensa y el condensado retorna por la bomba del circuito de potencia al intercambiador de calor. La Bomba de potencia a parte de enviar el fluido al intercambiador sirve para mantener la diferencia de presión necesaria entre la entrada y salida de la turbina.

Para eliminar el calor de condensación, se recurre a una torre de refrigeración alimentada con agua fresca superficial.

5.5 CICLO KALINA

En busca de mejorar las centrales binarias existe un tipo de centrales modificadas. Son las llamadas centrales de ciclo de Kalina.

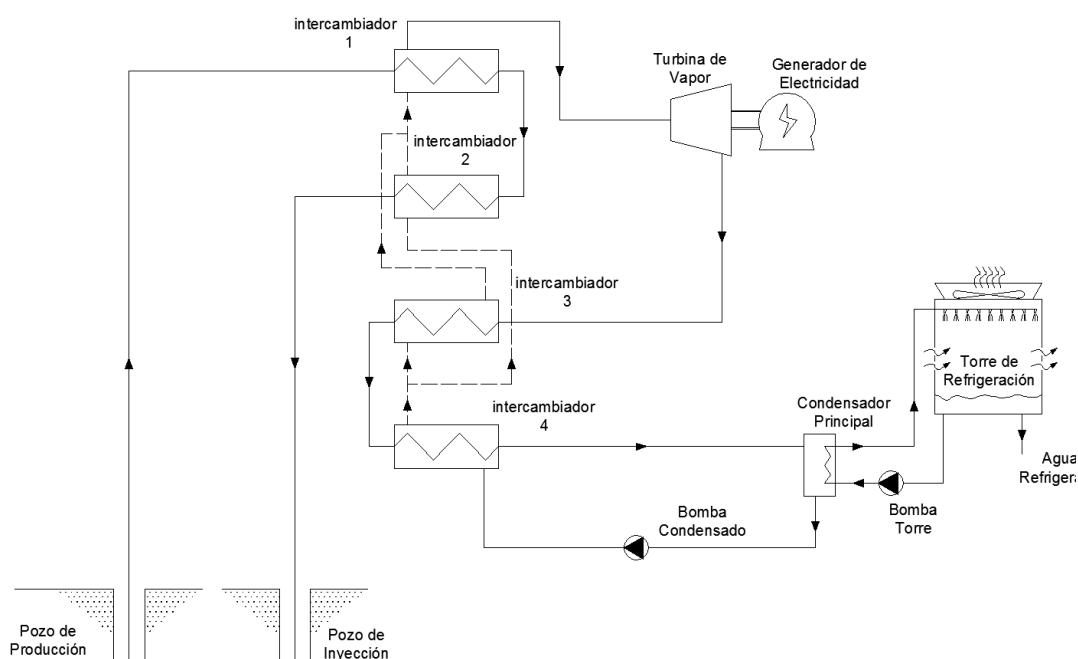


Figura 20. Esquema de una central de Ciclo de Kalina.



Su funcionamiento consiste en utilizar una mezcla de dos refrigerantes distintos, como representa el esquema anterior, y que se diferencia de los ciclos binarios en los siguiente:

En lugar de una sustancia pura, el fluido de trabajo del circuito secundario está formado por una mezcla de dos sustancias que tienen distinto punto de ebullición.

En vez de dos intercambiadores de calor, un precalentado y un evaporador (del esquema del ciclo binario) , se instalan cuatro intercambiadores. Los cuales trabajan a cuatro niveles térmicos escalonados, aprovechando que las dos sustancias, en estado líquido, evaporan a distinta presión. Los dos primeros intercambiadores (1 y 2) extraen el calor del agua geotérmica y los siguientes recuperan calor residual de vapor a la salida de la turbina. El circuito se cierra a través de un condensador como en el resto de las centrales geotérmicas que se han expuesto.

5.6 CENTRALES DE CICLO HÍBRIDOS

Debido a que las características de los recursos geotérmicos son muy variadas, desde el vapor seco al agua caliente, condiciones de presión y temperatura en la boca del pozo muy diversas, arrastre de partículas sólidas y arena, gases disueltos, sales disueltas, etc., se han construido centrales en las que se han combinado los ciclos expuestos, por ese motivo se conocen como centrales híbridas.

- Central de vapor seco y ciclo binario.
- central de flash simple y ciclo binario.
- Central integrada de simple y doble flash.
- Central geotérmica con combustible convencional de apoyo.

6. SITUACIÓN DE YACIMIENTO GEOTERMICO

Uno de los principales objetivos de este trabajo a parte de demostrar el funcionamiento del sistema de condensación y de extracción de incondensables (NCG). Es mostrar una optativa de obtención de energía eléctrica renovable en España. Esta lección además puede se podría explotar en muchos más lugares que los típicos yacimientos geotérmicos. Aquí es donde entra la tecnología EGS y la búsqueda de roca caliente seca para crear una zona de potencial geotérmico.

En España existen yacimientos geotérmicos que en su día se rechazaron por el hecho de que no poseían un fluido calo portador que utilizar para obtener energía. Sin embargo con el desarrollo de la energía EGS se conseguirá transformar la energía térmica y cinética del fluido geotérmico en energía eléctrica.

Existen la península ibérica zócalos de roca fracturada (zonas naranjas y rosas del mapa) que servirían para inyectar un fluido de y fracturar la roca. A mayor números de fracturas mayor superficie de intercambio de calor habrá entre la roca y el fluido de geotérmico.



Figura 21. Representación de los posibles yacimiento geotérmicos en España [16]

Principalmente en Almería según los últimos de estudios de la Agencia Andaluza de la energía (de la consejería de economía, innovación y medio ambiente) se estudia la posibilidad de crear centrales geotérmicas por su potencial geotérmico.

Se han detectado por sondeos que el potencial térmico de zonas de Andalucía puede rondar sobre los 80-100 MW, pero que en principio se desestimaron por qué no poseían un acuífero. Además debido a que sus rocas provocan una capa impermeable era también inviable su regeneración de agua de forma natural durante su explotación.

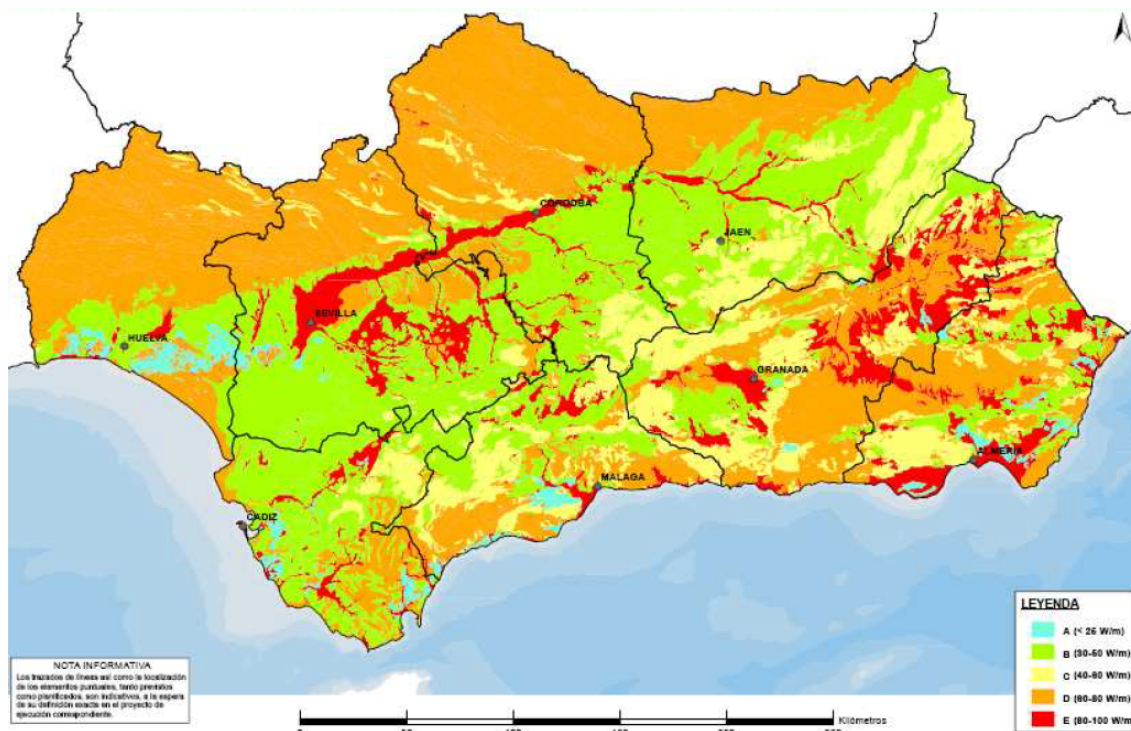


Figura 22. Mapa de potencia geotérmica de la provincia de Andalucía (las zonas rojas son de 80-100MW) [23]

Se ha elegido Andalucía como un ejemplo de yacimiento de roca seca fracturada. En España existen más yacimientos de roca seca fracturada. Pero sobre todo se ha elegido Andalucía para demostrar el tipo de tecnología que se podría utilizar para un yacimiento de entalpía media. En concreto en Almería existe un yacimiento de este estilo (Roquetas del Mar) y otro en Lebrija en Sevilla. Estos yacimientos según los últimos sondeos se encuentran a una temperatura de 180°C y 150°C respectivamente. Además se encuentra a una distancia de la superficie a 3500m el de Lebrija y 2500m el de Roquetas del mar.

Se eligen yacimientos media entalpía ya que es un recurso más numeros que los yacimientos de alta entalpía. Pero cuando los yacimientos está por debajo de los 150°C se utilizan ciclos binarios para obtener energía. Esta tecnología es más cara y complicada de adaptar, sin embargo las centrales de vapor seco o flash son más baratas y fáciles de adaptar.

Las centrales de vapor seco como de flash suele utilizar como fluido de trabajo agua. Es el más fácil de encontrar, es decir, barato y además no es demasiado agresivo con las instalaciones de las plantas geotérmicas.

Las centrales de vapor seco se caracterizan porque a la salida de los pozos geotérmicos el vapor es sobrecalentado o el agua saturada tiene un título de vapor muy cercano a 1. Esto es beneficioso por que la perdida de carga en el separador es menor cuando el título de vapor es más cercano a 1. Peso a que las centrales de vapor seco serían la primera elección los yacimientos geotérmicos de media entalpía suele estar en estado saturado y con un título de vapor de 0,1 a 0,5.

La elección de yacimiento para presentar los cálculos ha sido Roquetas del mar, ya que es un yacimiento de 180 °C de un título del vapor del 0,4 ya que está en un estado de agua saturada. El yacimiento por estar a 180°C tendrá una presión de unos 10 bar.

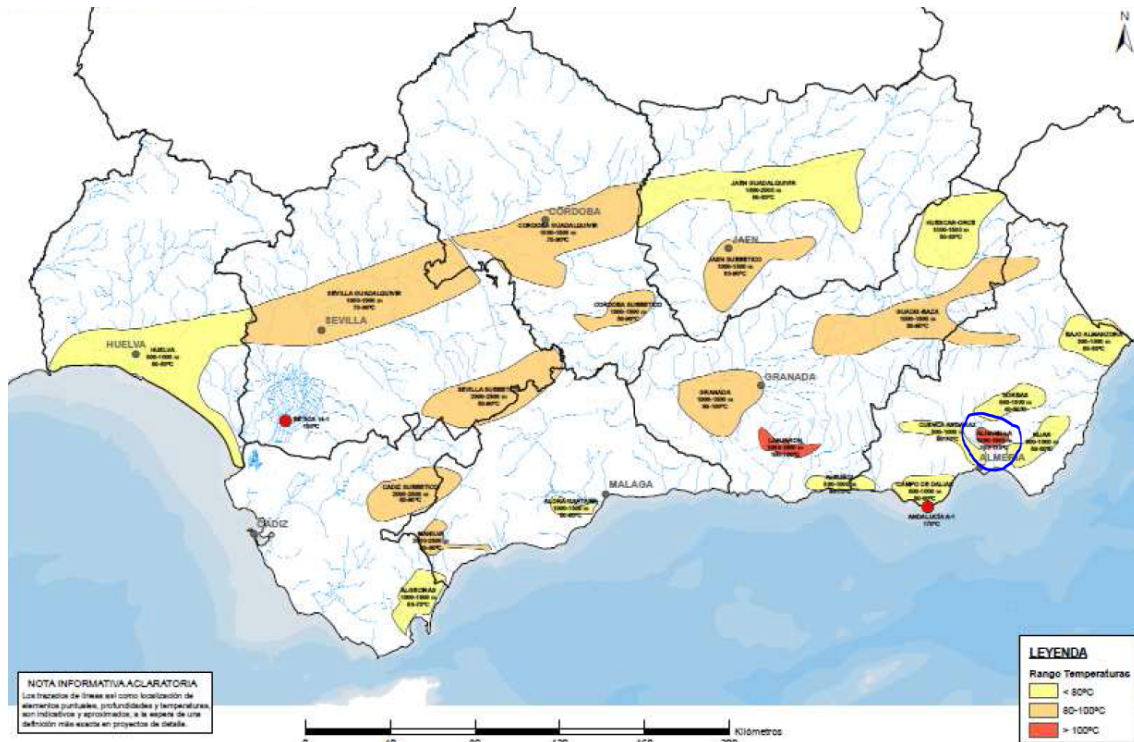


Figura 23. Representación del lugar de elección del yacimiento geotérmico [23]

El yacimiento de las Roquetas del Mar entre una profundidad de 2600m y 2700m está compuesto de roca sedimentaria. Son materiales carbonatados de la base del terciario o mantos de Alpujarrides. Es una base de aproximadamente unos 15 km².

Podemos calcular de manera orientativa el calor que posee el yacimiento según del procedimiento de cálculo del IGME.

$$RBA_i = V_i \cdot \rho_i \cdot c_i \cdot \frac{T_i - T_0}{2}$$

RBA_i = Calor de un yacimiento a una altura i (Julios)

V_i = Volumen de terreno desde la superficie hasta la profundidad i . La superficie del terreno estimado será de 15km² (m³)

ρ_i = Densidad media de la columna rocosa hasta la profundidad i . Para los materiales existentes en el subsuelo de Andalucía se toma como 2600kg/m³

c_i = Capacidad calorífica media de una columna rocosa hasta una profundidad i . Para los materiales existentes en Andalucía se ha tomado de 900Julios/kg · m³.

T_i = Temperatura a la profundidad i . (°C)

T_0 = Temperatura media anual en superficie. Para Andalucía y a falta de estimaciones concretas se toma un valor de 16°C. El valor comúnmente citado en la bibliografía climatológica es algo superior (16,3-16,5°C) habiéndose redondeado la cifra a efectos de sencillez de cálculo. (°C)

$$RBA_{2500m} = 2500(m) \cdot 15 \cdot 10^6(m^2) \cdot 2600 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 900 \cdot \left(\frac{Julios}{kg \cdot ^\circ C}\right) \cdot \frac{180^\circ C - 16^\circ C}{2}$$

$$= 7,2 \cdot 10^{18} Julios$$

A continuación descrito el tipo de yacimiento existente, se pasa a discriminar y seleccionar el tipo de tecnología más adecuada.

7. CENTRAL GEOTÉRMICA INICIAL

Como se ha descrito anteriormente nos encontramos ante un yacimiento de media entalpía pero en el cual existe vapor saturado con un título de vapor de 0,3 , lo cual significa que todavía existe en un estado bifase. Debido a eso no puede ser una central de tipo vapor seco pero si podría ser viable elegir una central de tipo flash. Aunque para que exista una producción en la que no se sufran variaciones de potencia se instalará una caldera de biomasa.

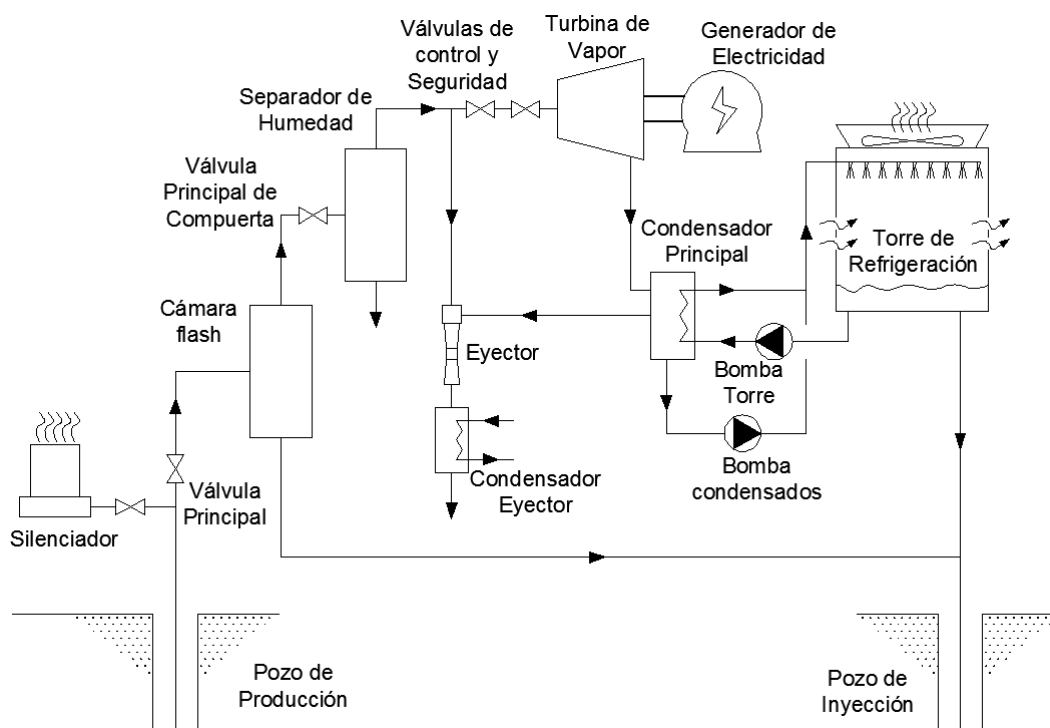


Figura 24. Esquema Preliminar de la central a diseñar.

8. DISCRIMINACIÓN DE TECNOLOGÍA

8.1 SILENCIADOR

Cuando la producción de vapor es muy grande en térmicos de cantidad de caudal sobre capacidad de producción de la planta es necesario este exceso desecharlo para no someter al sistema a sobrepresiones que puedan causar daño; el ruido que genera los vapores desechado puede ocasionar muchas molestias no solo para quienes trabajan cerca de la planta sino para la fauna y las personas residentes a la zona de desecho.

Estos equipos también son utilizados a la salida del agua hirviendo porque al ser desechada al ambiente se produce evaporación instantánea que a su vez produce ruido.

Además de los casos nombrados se desecha vapor o agua caliente para cuestiones de mantenimiento o en casos de emergencia (sobrepresión) a lo largo de todo el sistema de explotación, conducción y producción.

El diseño más empleado hoy en día es el inventado en Nueva Zelanda:

Es un silenciador sencillo y económico, compuesto de una placa doblada en V hecha de acero de alta resistencia, por donde pasa el fluido; la placa está instalada de manera tangencial a la estructura externa hecha en forma de torres cilíndricas gemelas. El fluido al girar alrededor de los cilindros va formando un remolino por el cual pierde energía cinética por la fricción de dicho fluido.

Por último a la salida se lo hace pasar por un vertedero de medición hacia el canal de desecho o bien hacia la atmósfera.

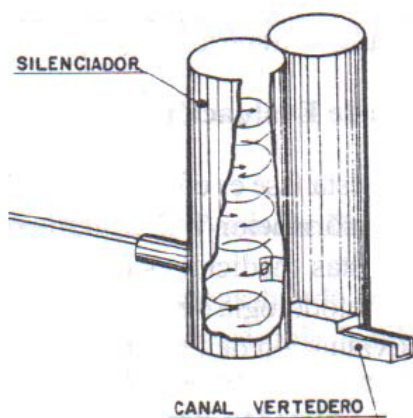


Figura 25. Silenciador típico de las centrales geotérmicas [19]

Este tipo de silenciadores tienen la finalidad de bajar el tono del ruido desde un nivel estridente de alta frecuencia a un sonido tolerable de baja frecuencia.

Actualmente se utiliza un material muy bueno para fabricarlos por cual poseen una vida útil de unos 12 años que es madera tratada pino radiata con un 5% de pentaclorofenol en aceite industrial Shell No.4.

En Islandia se utiliza un relleno de rosca con un contenedor de acero.

Uno de los silenciadores más utilizados en geotérmica son los silenciadores de absorción/difusión

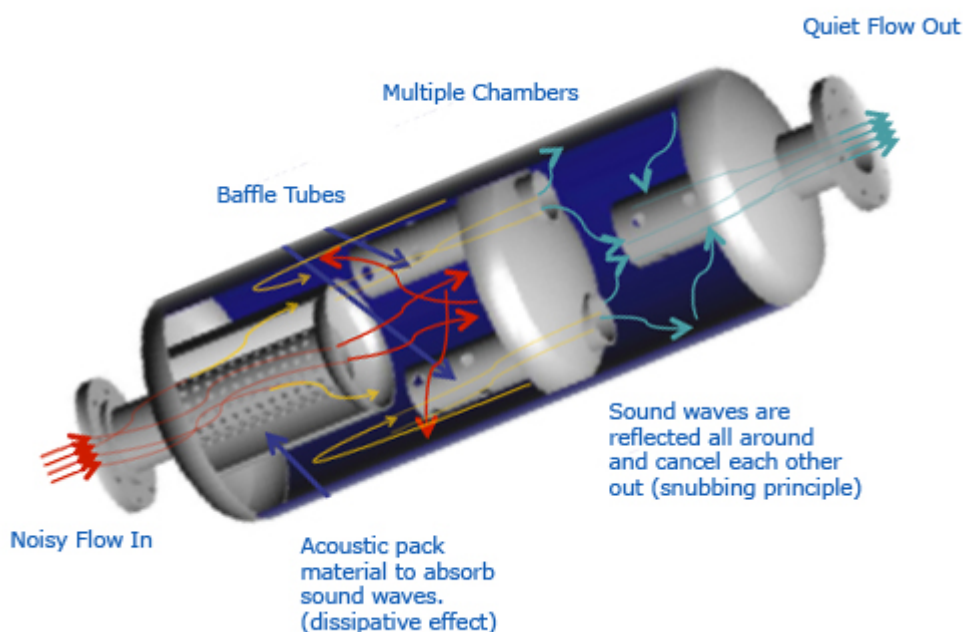


Figura 26. Silenciador fonoacústico de Peerless [30]

Atenúa el ruido pasando por un material fonoabsorbente que atenuará el sonido por un efecto disipativo. A continuación, pasará por unos tubos deflectores que provocan que las ondas de sonido se cancelen ya que los tubos deflectores han modificado la trayectoria de la onda. Por último saldrá del silenciador provocando un ruido que no supere los 40 dbA.

Sin embargo, es más adecuado el primero ya que son más económicos y además protegen mejor en lo referente a sobrepresiones. Además se fabrican para mayores caudales lo que es interesante para centrales geotérmicas.

8.2 CÁMARA FLASH O SEPARADOR

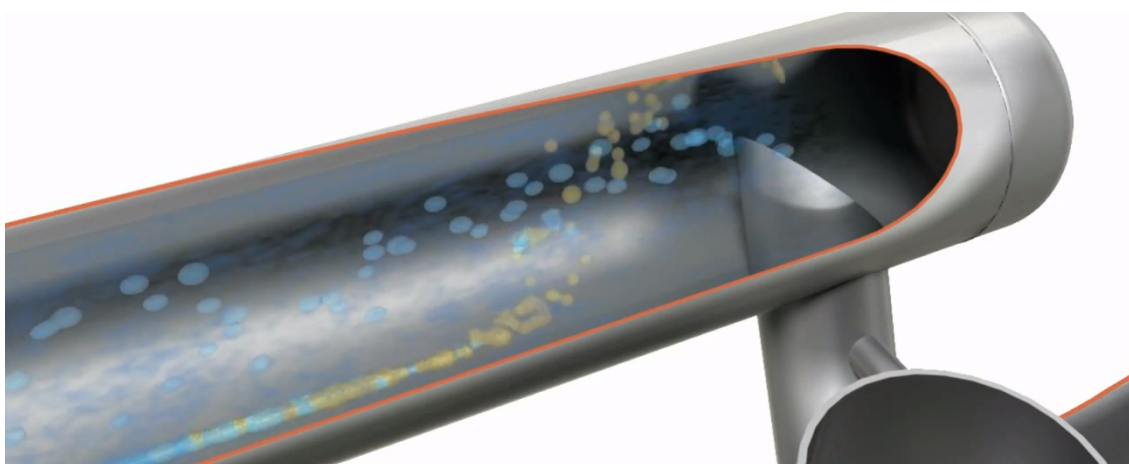
La acción principal de los separadores en geotermia es separar el vapor útil del líquido que además arrastran partículas sólidas. Existen diversas clasificaciones de separadores pero lo que buscamos es que sean de la mayor eficiencia posible. Por eso mostraremos los de mayor relevancia y elegiremos el más acorde a nuestras necesidades.

8.2.1 SEPARADOR DE VUELTA EN U



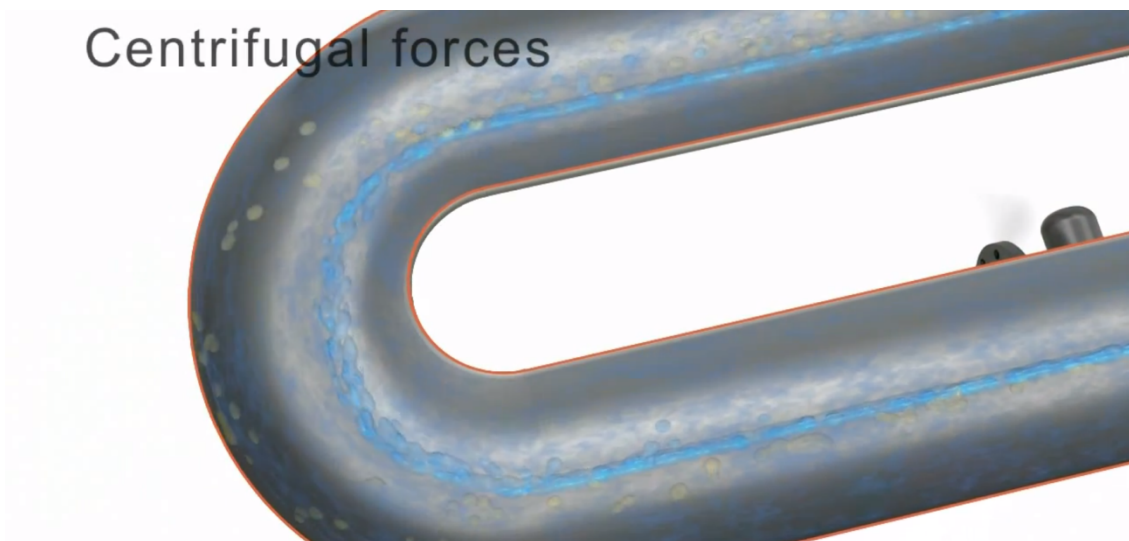
Figura 27. Separador en U de Alfa Laval [31]

Es un tipo de separador consiste en inyectar un fluido geotérmico a alta velocidad para que al introducirse por la boquilla superior el fluido geotérmico choque con la pared y comience a separarse la fase líquida de la fase gaseosa por el golpe y en el recorrido por el trayecto hasta el codo por diferencia de densidad.



Al llegar al codo por acción de la fuerza centrífuga se chocará la parte más densa, que serán las partículas sólidas más líquido que sigue conteniendo el fluido geotérmico y conseguirá despegarse del gas útil de la parte líquida y sólida.

Centrifugal forces



Por último en el final del recorrido el gas saldrá a la tubería destinada por la tubería y el líquido más partículas sólidas caerán por una pierna barométrica.



El problema de estos separadores es que su eficiencia encontrarse entre 80-90% y para un central de media entalpía nos interesa sacar la mayor parte de vapor útil.

8.2.2 SEPARADOR EN LÍNEA

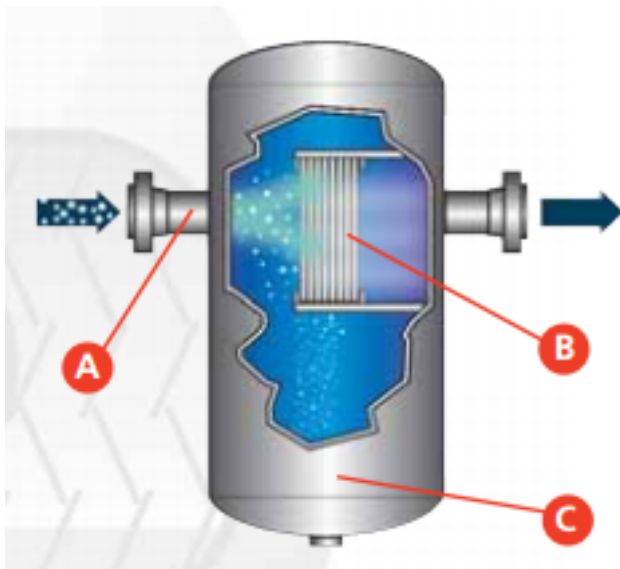


Figura 28. Separador en línea alfa Laval [31]

Para la explicación del funcionamiento de este tipo de separador nos vamos a servir de la figura. El flujo bifase entra dentro del separador (A) y debido a que el espacio es más grande el gas tiende a ocupar todo el espacio. Por inercia el gas entra en contacto con las paletas de la zona de extracción (B). Las fuerzas de inercia resultantes del rápido cambio de dirección provoca que las gotas del líquido, contenido en el flujo bifase, entre en contacto con las paredes de las paletas. Cuando se empiezan acumular las gotas en las paletas caen por efecto de la gravedad a el depósito de el líquido en la parte inferior del recipiente y se aleja del gas principal que saldrá detrás de las paletas.

Este tipo de separadores es poco usado en geotermia ya que su eficiencia no es muy alta. Pero sin embargo es considerado para aplicaciones donde el espacio es limitado

8.2.3 SEPARADORES HORIZONTALES

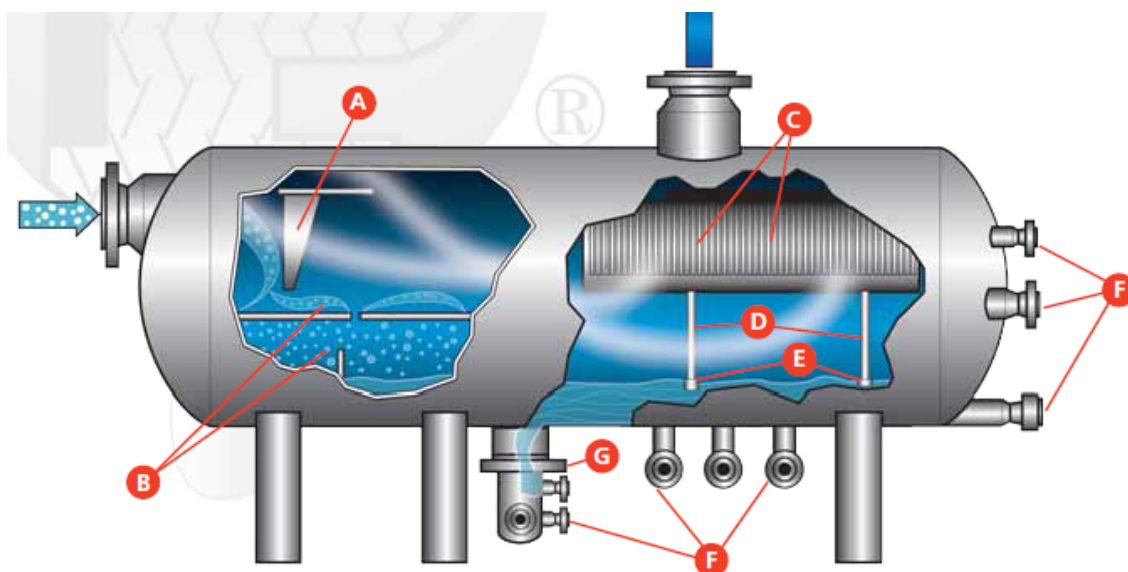


Figura 29. Separador horizontal Alfa Laval [31]

El funcionamiento de este tipo de separador consiste en:

El flujo bifase entra en el recipiente y es desviado por un deflector de entrada para extraer las gotas (A). El líquido cae en la parte inferior del recipiente a causa de los platos horizontales, que crean un primer sumidero (B). El gas y la niebla de gotas restantes entran en el separador de paletas (C). El líquido residual recogido en la parte inferior del paquete de paletas y se drena por las tuberías hacia abajo (D). Sumergidas las bajantes o tuberías en el líquido se consigue un sello hidráulico y además un drenaje perfecto (E), mientras el gas sale por encima del paquete de paletas. f y g son los drenajes y controladores de nivel de líquido, que garantiza la descarga de líquidos de una manera eficiente en el recipiente.

No utilizaremos este tipo de separadores en la central geotérmica ya que a menudo se pueden quedar obstruidos y además ocupan muchísimo espacio.

8.2.4 SEPARADOR CICLÓNICOS

Los separadores ciclónicos son equipos mecánicos estacionarios, ampliamente utilizados en la industria, que permiten la separación de partículas de un sólido o de un líquido que se encuentran suspendidos en un gas portador, mediante la fuerza centrífuga. En tanto, los hidrociclones son equipos que permiten la separación de líquidos de distintas densidades, o de sólidos de líquidos.

Los separadores ciclónicos son equipos muy sencillos, que al no poseer partes móviles son de fácil mantenimiento. Tienen la desventaja de ser poco versátiles, ya que no se adaptan a cambios de las condiciones de operación, por lo cual son poco flexibles a los cambios de concentración de polvos, caudal de gas y distribución de tamaños de partículas.

El principio de funcionamiento de un ciclón se basa en la separación de las partículas mediante la fuerza centrífuga (del orden de cientos de g), lo que lo hace más efectivo que las cámaras de sedimentación, además ocupan un espacio mucho menor que éstas.

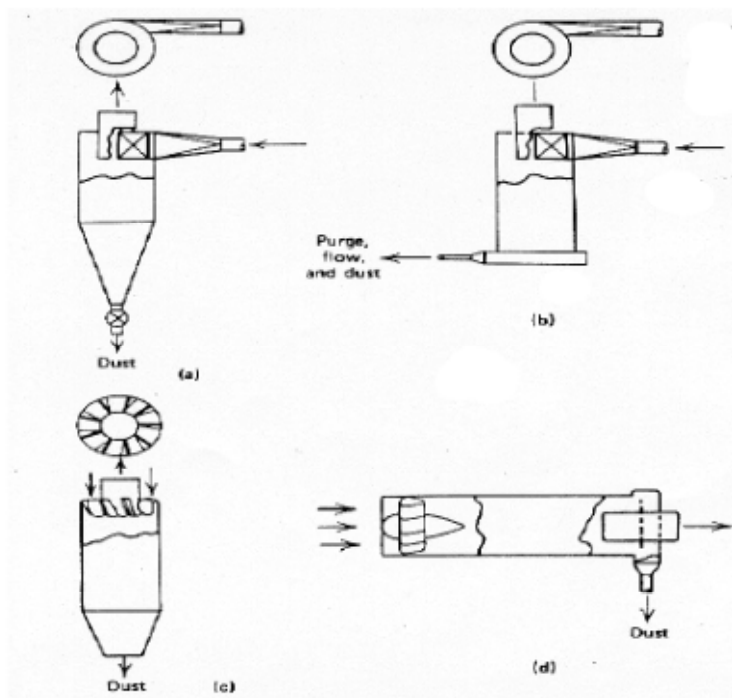


Figura 30. Diferentes configuraciones de un separador ciclónico [22]

- (a)- entrada tangencial y descarga axial.
- (b)- entrada tangencial y descarga periférica.
- (c)- entrada y descarga axiales.
- (d)- entrada axial y descarga periférica.

Los ciclones de entrada de gas axial funcionan de manera similar que los de entrada tangencial, solo que en la entrada del gas (entrada anular) tienen dispuestos unos álabes fijos que le imprimen el movimiento en espiral al gas sucio que entra al ciclón. Los ciclones axiales tienen diámetros menores que los tangenciales (25 a 305 mm), debido a esto tienen alta eficiencia, pero baja capacidad.

Los ciclones de entrada tangencial y descarga axial representan el ciclón tradicional y, aunque se pueden construir con diámetros más grandes, lo más frecuente es que éstos se encuentren entre los 600 y los 915 mm.

En los ciclones con entrada tangencial y descarga periférica, el gas sufre un retroceso en el interior del equipo al igual que ocurre en un ciclón convencional. Sin embargo, presenta el inconveniente de que el polvo no es eliminado en su totalidad de la corriente gaseosa, aunque sí se produce una concentración del mismo.



Por otra parte, los ciclones de entrada axial y salida periférica proporcionan un flujo directo que es muy adecuado para conectarlos a fuentes de gran volumen, donde los cambios en la dirección del gas podrían ser un inconveniente.

Por tanto los más utilizados son los separadores ciclónicos de entrada de gas tangencial y salida del sólido axial, por lo cual nos limitaremos al estudio de estos, ya que serán los empleados en nuestra central geotérmica.

8.2.4.1 PARTES PRINCIPALES

La entrada de gas sucio, conectada tangencialmente en la parte superior del cuerpo cilíndrico o barril del ciclón.

El barril cumple la función de imprimir al gas un movimiento en espiral descendente.

Conectado al barril hay un cono invertido que cumple la función de conducir el polvo separado hacia el tubo de descarga, de longitud variable, también denominado cola o pierna del ciclón.

En la base del cono invertido se produce la inversión del flujo de gas, de modo que el gas comienza allí una espiral en forma ascendente, concéntrica a la espiral descendente, saliendo el gas limpio por el conducto superior de salida.

Los polvos separados son descargados en la pierna del ciclón. En la cola del ciclón puede existir o no una válvula de chanela que se abre solamente por el peso de los sólidos acumulados en la pierna del ciclón, produciendo de esta manera la descarga de los polvos.

Los ciclones pueden operar a altas temperaturas. La temperatura máxima depende del material de construcción del ciclón. Para ciclones construidos en acero al carbono la máxima temperatura de operación es de 800 C. En cuanto a la presión, lo importante es la diferencia de presión a la cual está sometido el ciclón. Si es un ciclón interno, por ejemplo en un lecho fluidizado que opera a altas presiones, la diferencia de presión interna y externa del ciclón es nula, por lo cual no deben tenerse consideraciones de resistencia en su diseño. En cambio si se trata de un ciclón es externo que procesa gas sucio a alta presión, tendrá una presión interna mucho mayor que la externa, lo cual deberá tenerse en cuenta en el diseño del mismo.

La fricción de las partículas sólidas erosionan severamente las paredes interiores del ciclón. Para disminuir el deterioro del mismo suele colocarse mallas del tipo hexagonal que se recubren con cemento.

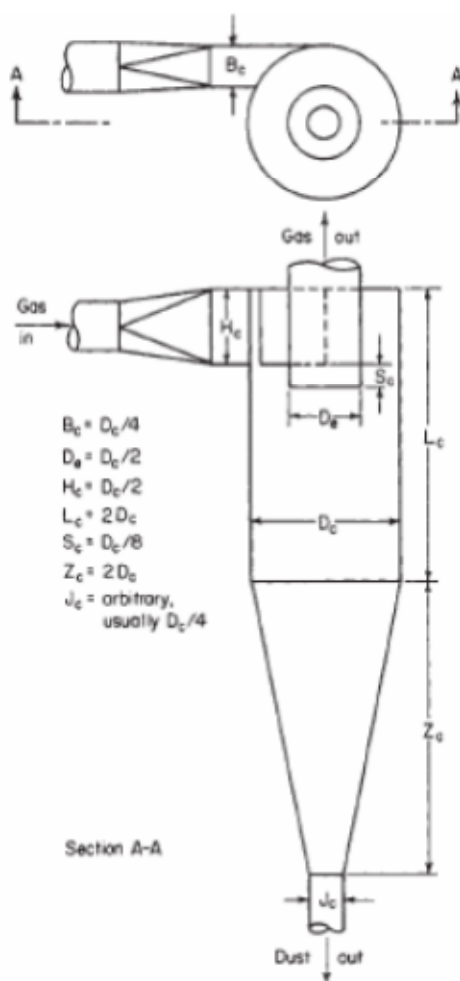


Figura 31. Dimensionado sencillo de un separador ciclónico [22]

8.2.4.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y MATERIALES

El gas ingresa por el conducto de entrada del ciclón a una velocidad V_i (velocidad de entrada al ciclón). Este conducto se halla ubicado en forma tangencial al barril o cuerpo del ciclón. Entra al cuerpo o barril y comienza el movimiento en espiral descendente. El cambio de dirección genera un campo centrífugo equivalente a cientos de veces el campo gravitacional terrestre. (cientos de g). Las partículas transportadas por el gas debido a su inercia, se mueven alejándose del centro de rotación o “eje del ciclón”, por acción de las líneas de fuerza del campo centrífugo, alcanzando las paredes internas del recipiente del separador ciclónico, donde pierden cantidad de movimiento y se deslizan por la pared del barril hacia el cono y desde allí a la pierna del ciclón.

El gas en su movimiento descendente va despojándose de las partículas sólidas y al llegar a la base del cono, invierte el flujo, siguiendo una espiral ascendente ya libre prácticamente de partículas (“gas limpio”). El movimiento del gas en el interior

del ciclón consiste en una trayectoria de doble hélice. Inicialmente realiza una espiral hacia abajo, acercándose gradualmente a la parte central del separador, y a continuación se eleva y lo abandona a través de una salida central situada en la parte superior. Esta doble espiral es la que se denomina flujo ciclónico. Las partículas más grandes y más densas son forzadas hacia las paredes del ciclón, dejando atrás las partículas.

Una vez que el gas penetra tangencialmente en el equipo se distinguen dos zonas de características distintas de movimiento:

En la zona próxima a la entrada del gas y en aquella más exterior del cilindro predomina la velocidad tangencial, la velocidad radial es centrípeta y la axial de sentido descendente. La presión es relativamente alta.

En la zona más interior del cilindro, correspondiente al núcleo del ciclón y con un diámetro aproximadamente igual a 0,4 veces el del conducto de salida del gas, el flujo es altamente turbulento y la presión baja. Se da el predominio de la velocidad axial con sentido ascendente.

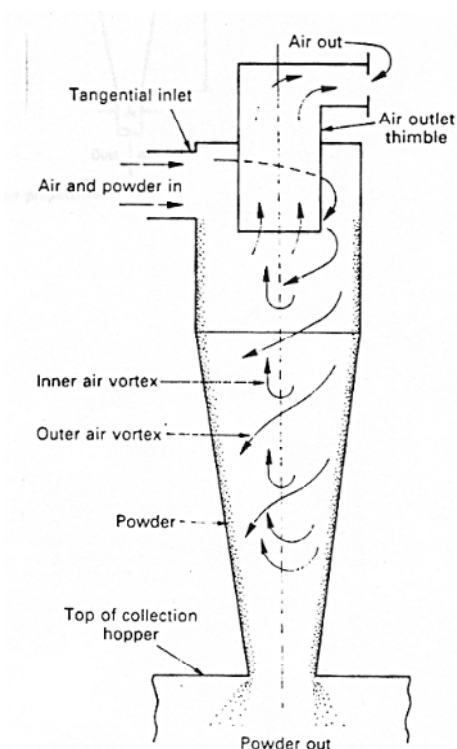


Figura 32. Dos zonas separa por el llamado cilindro Stairmand [10]

Por tanto, cualquier partícula se encuentra sometida a dos fuerzas opuestas en la dirección radial, la fuerza centrífuga y la de rozamiento. Ambas fuerzas son función del radio de rotación y del tamaño de la partícula, por esta razón las partículas de tamaños distintos tienden a girar en órbitas de radios distintos.

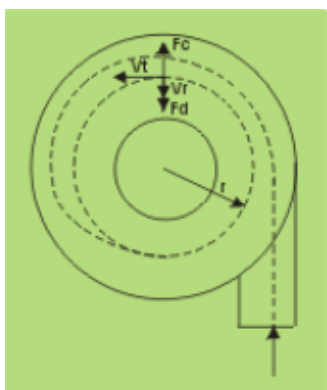


Figura 33. Representación de fuerzas en un ciclón [10]

Como la fuerza dirigida hacia el exterior que actúa sobre la partícula aumenta con la componente tangencial de la velocidad, y la fuerza dirigida hacia el interior aumenta con la componente radial, el separador se debe diseñar de manera que la velocidad tangencial sea lo más grande posible mientras que la velocidad radial debe ser lo más pequeña posible.

Existe una órbita de diámetro $0,4D_e$ (siendo D_e el diámetro del cilindro concéntrico de salida de los gases), conocida como cilindro ideal de Stairmand, que separa la zona en la cual las partículas van a ser capturadas de aquella en la que los sólidos escapan junto con el gas.

Si la partícula sigue una trayectoria cuya órbita se encuentra dentro del cilindro de Stairmand y con una componente axial ascendente, la partícula abandonará el ciclón sin ser retenida. Si en caso contrario la órbita es exterior a este diámetro $0,4D_e$, entonces la componente axial será descendente y la partícula acabará depositándose en el fondo del separador ciclónico.

Luego del ingreso el gas con las partículas suspendidas forma una espiral descendente axial, por la cual descienden los sólidos. Y una espiral ascendente que alcanza el tubo de descarga por el tope, en la cual sale el gas limpio.

El aire entra cargado de polvo recorre un camino en espiral alrededor y hacia abajo del cuerpo cilíndrico del ciclón. La fuerza centrífuga desarrollada en el vértice tiende a desplazar radialmente las partículas hacia la pared, de forma que aquellas que alcanzan la pared deslizan hacia abajo dentro del cono y se recogen. El gas al llegar al cono invierte su dirección iniciando su carrera ascendente en forma de espiral alrededor del eje del ciclón hasta alcanzar el tubo de salida de gas limpio, en la parte superior del ciclón.

El ciclón es entonces esencialmente un dispositivo de sedimentación en el que una intensa fuerza centrífuga (de alrededor de cientos de g), que actúa radialmente, es la que se utiliza en vez de una fuerza gravitacional relativamente débil dirigida verticalmente. Los ciclones pueden separar partículas de polvo del orden de 10 micrones (10 a la menos 6 de metros).



Este flujo de doble espiral descendente-ascendente constituye el llamado fenómeno ciclónico, y su descripción desde el punto de vista matemático es muy complejo, por lo cual el diseño del ciclón se basa generalmente en la experiencia, es decir es de naturaleza empírica.

La eficiencia de un ciclón es de mucha importancia. Relaciona la cantidad de sólidos descargados por la pierna del ciclón, respecto a los alimentados. También es importante la pérdida de carga del ciclón. La pérdida de carga es la suma de varios factores.

Los ciclones pueden ser sometidos a altas temperaturas, dependiendo del material de construcción. Si es acero al carbono o acero inoxidable, puede operarse hasta temperaturas de 800 C.

Los separadores ciclónicos pueden fabricarse con cualquier material apropiado que sea resistente al golpeo de partículas y corrosión. Pueden usarse metales como, acero inoxidable y aluminio y aleaciones de cromo y níquel. No obstante, a menos que el metal pueda fundirse, es difícil conformarlo en pequeños tamaños, en tal caso se prefieren materiales de cerámica, vidrio y plástico que son fuertes, resistentes a la presión y capaces de retener su forma bajo la presiones de gas con las que van a trabajar

Empresas como Acnidec, y acero de los Andes cuentan con infraestructura y tecnología necesaria para diseñar y construir los separadores flash utilizados en plantas geotérmicas.

El funcionamiento seguro de estas unidades sólo puede garantizarse si su instalación y puesta en marcha se realiza correctamente y el mantenimiento lo realiza una persona cualificada según las instrucciones de operación. También debe cumplirse con las instrucciones generales de instalación y seguridad de construcción de líneas y plantas, así como el uso apropiado de herramientas y equipo de seguridad.

Aislamiento: Considerar si el cerrar las válvulas de aislamiento puede poner en riesgo otra parte del sistema o en personal. Los peligros puede incluir: aislamiento de orificios de venteo, dispositivos de protección de alarmas. Cerrar las válvulas de aislamiento de una forma gradual.

Presión: Antes de efectuar cualquier mantenimiento en el separador, considerar que hay o ha pasado por la tubería. Aislar (usando válvulas de aislamiento independientes) y dejar que la presión se normalice y dejar enfriar antes de abrir. No asumir que el sistema está despresurizado aunque el manómetro de presión indique cero.

Temperatura: Dejar que se normalice la temperatura después de aislar para evitar quemaduras y considerar si se requiere usar algún tipo de protección (por ejemplo gafas protectoras).

Eliminación: Estos productos son totalmente reciclables. No son perjudiciales con el medio ambiente si se eliminan con las precauciones adecuadas.

8.3 SEPARADOR DE HUMEDAD



Figura 34. Separador de humedad de la compañía TLV [33]

Son los llamados "Demister", son dispositivos instalados en los recipientes de vapor que separan el líquido del vapor para mejorar la eliminación de las gotas arrastradas en una corriente de vapor. Los desnebulizadores son una malla de tipo coalescente, paquetes de paletas o de otra estructura destinada a la agregación de la niebla en gotitas que cuando son lo suficientemente numerosas como para separar de la corriente de vapor.

Los desnebulizadores pueden reducir el tiempo de residencia requerido para separar una gota de líquido dado, reduciendo así el volumen. Los Demister se utilizan a menudo donde la calidad del vapor es importante en lo que se refiere a los líquidos arrastrados en particular, como por ejemplo la entrada a una turbina.

Un ejemplo de estos equipos son los equipos horizontales antes mencionados.

8.4 SEPARADOR ATMOSFÉRICO

Un separador atmosférico en una central geotérmica a la salida del demister y a él se le envía el vapor en función de las necesidades de la turbina. Cuando hay un exceso de vapor o en parada de emergencia se envía este separador. El vapor saldrá a la atmósfera por una chimenea y el agua condensada se aprovecha para otros procesos.

Se suele diseñar de acero de carbono y se instala verticalmente.

8.5 TANQUE DE RECOLECCIÓN

Se colocan bajo los separadores ciclónicos y para diseñarlo lo que se hace es medir el caudal de agua que va a ingresar y el tiempo de llenado del mismo para saber por medio de sensores cuando se tiene que desechar el fluido para que ocurran inundaciones. Además se verá el espacio físico y las características del fluido para según eso escoger los materiales, dimensión y propiedades de los mismos.

$$V_{\text{volumen}}(m^3) = \text{Caudal} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot \text{tiempo}(s)$$

Ecuación 1. Estado estacionario

Cuando las fluctuaciones son de periodos largos los tanques resuelven el problema, por lo tanto se da una solución como la realizada en la mayoría de las plantas por medio de válvulas de descarga por flotador (costosas), o si no, se sigue lo inventado en ciertos campos húmedos por medio de orificios de boquilla acampanada, por donde pasa una amplia gama de fluidos sin inundación de corriente arriba del vapor y sin pérdidas de sellamiento.

8.6 TURBINAS DE VAPOR

La energía eléctrica sacada de un ciclo geotérmico viene directamente relacionada de la turbina. Una turbina de vapor se basa en el principio de transformar la energía cinética del vapor en energía mecánica. Esta energía mecánica a su vez se traslada al generador de electricidad, que por configuración de campos electromagnéticos induce una corriente eléctrica.

Aunque las turbinas utilizadas en geotermia no se diferencian en especial de las demás centrales térmicas, se debe tener especial cuidado en su diseño. El vapor que se genera es del agua pero este agua posee distintas propiedades que el que transcorre por los ríos, los mares, etc. ya que arrastra sedimentos del yacimiento y alberga gases distintos del vapor de agua. Es difícil estimar y controlar la calidad de vapor, cantidad, presión, temperatura y así sucesivamente. Por lo tanto, antes de diseñar una central geotérmica se estudia las propiedades y, a veces, se llevan a cabo una serie de experimentos en él.



8.6.1 PRINCIPIOS DISEÑO

A la hora de diseñar una turbina en geotermia hay que seguir estos 3 principios:

1. Se deber tener especial precaución con el vapor saturado cuando el titulo de vapor es alto porque a menudo se condensa cuando la presión es baja y la humedad relativa además también es alta.
La acción de frenado ejercida por la humedad higroscópica en los álabes de la turbina conduce a un deterioro por erosión. Todo esto acarrea que disminuya el rendimiento , porque la propiedades de resistencia de la turbina cambian y además también empeora el drenaje.
En las turbinas de vapor de las centrales nucleares tienen debilidades similares, por lo que emplean separadores de humedad para mejorar su rendimiento y protege la carcasa contra la erosión por medio de placas de erosión-blindajes hechos de acero inoxidable.
2. En geotermia el flujo de vapor arrastra fragmentos del interior de la corteza terrestre en forma de micro-sólidos. La adhesión de estos elementos en el recorrido del vapor por la turbina afecta al rendimiento de la turbina. Dependiendo de la dureza y tamaño de dichas partículas sólidas, diversas piezas de la turbina se desgastan por erosión. La fuerza con que golpeen estas partículas disminuye la resistencia a fatiga provocando una rotura catastrófica. Si además golpea con demasiado fuerza puede llegar a avería la turbina también.
De manera preventiva se colocan los separadores, para que así no lleguen las partículas a la turbina.
3. El examen de los gases incondensables que viene del yacimiento (S, Cl, etc.) se ha determinado que son corrosivos. Tras esto se ha investigado en los pozos geotérmicos para hallar materiales adecuados. Se ha llegado a la conclusión de que los materiales de alta resistencia son aleaciones de Cr-Acero, acero-Cr-Mo y acero inoxidable.

8.6.2 PARTES PRINCIPALES

Los elementos que estructuran una turbina de vapor son los siguientes:

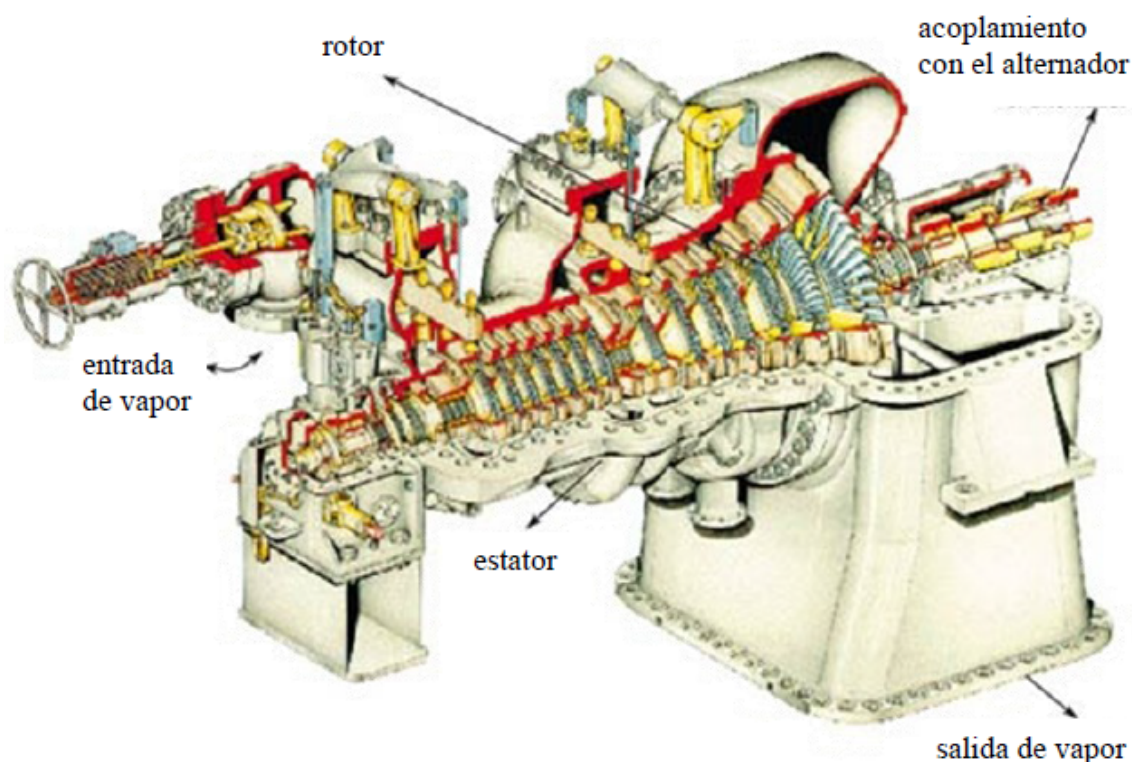


Figura 35. Sección de una turbina de vapor [24]

8.6.2.1 CARCASA

La carcasa se divide en dos partes: la parte inferior, unida a la bancada y la parte superior, desmontable para el acceso al rotor. Ambas contienen las coronas fijas de toberas o álabes fijos. Las carcasas se realizan de hierro, acero o aleaciones de este, dependiendo de la temperatura de trabajo, obviamente las partes de la carcasa de la parte de alta presión son de materiales más resistentes que en la parte de escape. La humedad máxima debe ser de un 10% para las últimas etapas.

Normalmente se encuentra recubierta por una manta aislante que disminuye la radiación de calor al exterior, evitando que el vapor se enfríe y pierda energía disminuyendo el rendimiento de la turbina. Esta manta aislante suele estar recubierta de una tela impermeable que evita su degradación y permite desmontarla con facilidad.

Las carcasas se prueban por medio de rayos X para la osmosis y la parte horizontal de la brida del acoplamiento son probados por medio de ultrasonidos para asegurar una vida larga y sin defectos. Después de la soldadura de toda la carcasa de una turbina se le emplea un recocido para eliminar el estrés del material.

8.6.2.2 ROTOR

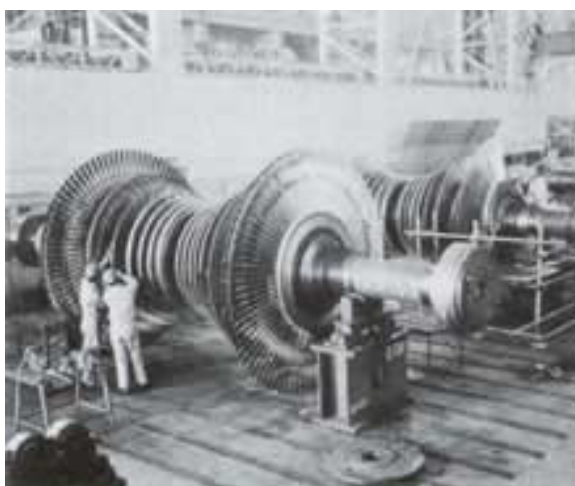


Figura 36. Rotor de unan turbina de vapor de 100 MW [24]

El material de los rotores de una turbina debe ser apto para la temperatura de trabajo, brida de acoplamiento y así sucesivamente están formado por mecanizado de piezas forjadas.

La turbinas suelen utilizar generalmente grandes diámetros girando a altas velocidades angulares. Hasta en el caso de una turbina de baja velocidad (entre 1500rpm y 1800rpm) significa una contracción en el impulsor montado en sus eje. La composición, tratamiento térmico, propiedades mecánicas y así sucesivamente de cada rotor debe ajustarse estrictamente a las normas, demostrando ser altamente fiables, ya que su material es probado a fallas mediante ultrasonidos antes y durante el proceso de fabricación.

Para eliminar la tensión residual causada por la forja y mecanizado, y para garantizar que el rendimiento sea estable, se somete a pruebas de calor. Estas pruebas se llevan a cabo a continuación del devastado en el lote de las plantas de fabricación. Después al insertar los álabes , se somete a pruebas de equilibrio dinámico que son llevadas a cabo para eliminar tanto como sea posible el desequilibrio de los rotores, lo cual causa vibraciones durante sus funcionamiento.

8.6.2.3 ÁLABES

Estas protuberancias que salen del rotor se suelen fabricar para aguantar las altas temperaturas de Cr-MO-V-W; y las palas de la parte de baja temperatura son 13Cr de acero inoxidable. Los álabes están formados por fresado de una barra.

En los primeros escalones de una turbina por donde entra el vapor suelen encontrarse problemas de que el aire pasa del intradós al extradós esto genera movimiento de vapor contrario al sentido para la producción: Por lo que se suele colocar un anillo recubriendo los alabes en la primera parte de la turbina, así conseguimos no dejar el hueco por el cual el aire se pasaba del intradós al extradós..

Más adelante en la turbina no es necesario colocar el anillo ya que el aire no tiende a desplazarse en dirección contraria.

La forma de los álabes delimita en gran medida la velocidad que puede alcanzar la turbina por eso es muy importante que no se desgaste y así pierdan su forma. Esto suele pasar sobre todo en los últimos escalones de la turbina cuando se alcanza una presión tan baja que el título de vapor baja y el vapor tiende a condensarse. La condensación en la turbina significa que choque gotas contra los álabes lo cual erosiona y fatiga los mismos. Las soluciones más adaptadas a parte de construirlos de un material resistente a los golpes es crear un sistema que acumule las gotas en los álabes y que por el peso se drene sin afectar al álabe. Son las llamadas del "drain hole" y el rasgado de las puntas de los álabes. El "drain hole" consiste en hacer hendiduras dentro de los álabes de tal forma de cuando se sature el vapor se introduzcan en las hendiduras de los álabes y que por acción de la fuerza centrífuga saldan el agua de los mismos. Otra solución es rasgar la punta de los álabes de tal forma de que cuando el vapor se satura el vapor se quede atrapado en los huecos y que por acción de la fuerza centrífuga las gotas se eliminen del alabe y se drene a continuación.

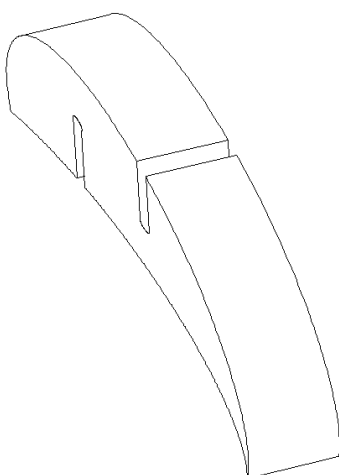


Figura 37. Drain Hole

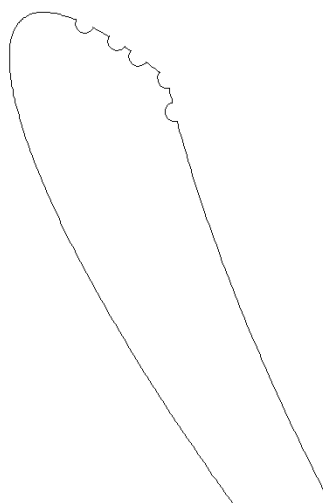


Figura 38. Rasgado de perfil

8.6.2.4 VÁLVULA DE REGULACIÓN

Regula el caudal de entrada de la turbina, siendo de los elementos más importantes de la turbina de vapor. Es accionada hidráulicamente con la ayuda de un grupo de presión de aceite (aceite de control) o neumáticamente. Forma parte de los lazos de control: el lazo que controla la velocidad de la turbina y el lazo que controla la carga o potencia de la turbina.

8.6.2.5 COJINETES DE APOYO DE BANCADA O RADIALES

Sobre ellos gira el rotor. Suelen ser de un material blando, y recubiertos de una capa de lubricante que disminuya la fricción. Son sustituidos periódicamente, bien con una frecuencia establecida si su coste es bajo respecto de su producción, o bien por observación de su superficie y cambio cuando se encuentre en un estado deficiente.

8.6.2.6 COJINETE DE EMPUJE O AXIAL

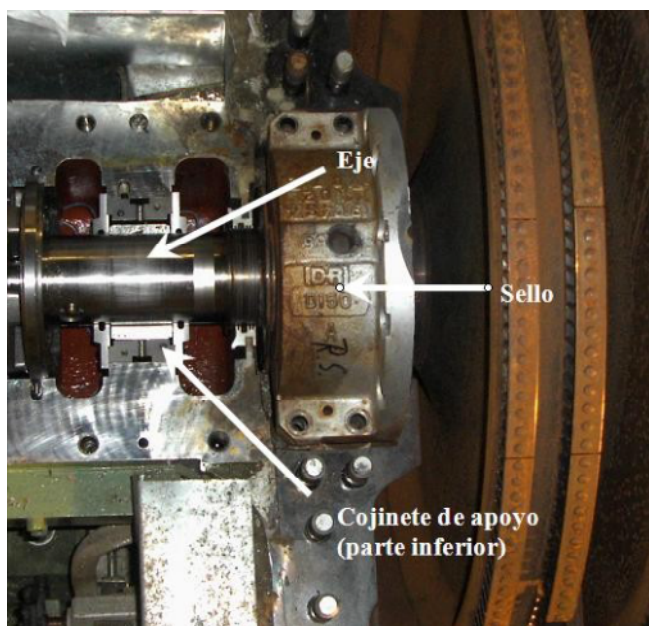


Figura 39. Fotografía de cojinetes de Empuje [24]

El cojinete axial, o de empuje impide el desplazamiento del rotor en dirección del eje, evitando que el empuje axial que sufre el eje por el defecto del vapor repercuta en el reductor, dañándolo seriamente. No se encuentra en contacto con el eje si no que hace tope con un disco que forma parte solidaria con el eje.

El cojinete está construido en un material blando que disminuya la fricción entre el disco y el cojinete. Además, debe encontrarse convenientemente lubricado.

Para comprobar el estado del cojinete, además de la medida de temperatura y las vibraciones del eje, se mide de forma constante el desplazamiento axial. Si se excede el límite permitido, el sistema de control provoca la parada de la turbina o impide que esta complete su puerta en marcha.

8.6.2.7 SISTEMA DE LUBRICACIÓN

Proporciona el fluido lubricante, generalmente de aceite. Para asegurar la circulación del aceite en todo momento el sistema debe estar equipado con tres bombas:



- Bomba mecánica principal: Esta acoplada al eje de la turbina, de forma que siempre que este girando la turbina está girando la bomba, asegurándose así la presión de bombeo mejor que con una bomba eléctrica. No obstante, en los arranques esta bomba no da presión suficiente, por lo que es necesario que el equipo tenga al menos una bomba adicional
- Bomba auxiliar: Se utiliza exclusivamente en los arranques, y sirve para asegurar la correcta presión de aceite hasta que la bomba mecánica puede realizar este servicio. Se conecta antes del arranque de la turbina y se desconecta a unas revoluciones determinadas durante el arranque, cambiándose automáticamente de la bomba auxiliar a la bomba principal. También se conecta durante las paradas de la turbina.
- Bomba de emergencia: Si se produce un problema de suministro eléctrico en la planta, esta queda sin tensión, durante la parada habría un momento en que las turbina se quedaría sin lubricación, ya que la bomba auxiliar no tendría tensión. Para evitar este problema, las turbinas suelen ir equipadas con una bomba de emergencia que funciona con corriente continua proveniente de un sistema de baterías.

8.6.2.8 SISTEMA DE EXTRACCIÓN

Los depósitos de aceite suelen estar a una presión por debajo de la atmosférica, para ayudar la extracción de los vapores del aceite y dificultar una posible fuga de aceite al exterior. Para conseguir el vacío, el sistema de lubricación suele ir equipado con un extractor.

8.6.2.9 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL ACEITE

El aceite en su recorrido de lubricación se calienta modificando su viscosidad, y por tanto, sus características lubricantes, llegando a degradarse si el calor es excesivo. Para evitarlo, el sistema de lubricación dispone de unos intercambiadores que enfrían el aceite, estos intercambiadores pueden ser aire-aceite, de forma que el calor del aceite se evacua a la atmósfera, o agua-aceite, de forma que el calor se transfiere al circuito cerrado de refrigeración con agua de la planta.

8.6.2.10 SISTEMA DE ACEITE DE CONTROL

Cuando la válvula de regulación se acciona oleo-hidráulicamente el conjunto de turbina va equipado con un grupo de presión para el circuito de aceite de control. Este, debe mantener la presión hidráulica. El sistema de control gobierna la válvula de salida del grupo, que hace llegar al aceite hasta la válvula de regulación de entrada de vapor con la presión adecuada.

8.6.2.11 SISTEMA DE SELLADO LABERÍNTICO DE VAPOR

Un sello laberíntico es un sello mecánico que se utiliza en torno un eje para prevenir la pérdida de aceite o de otros fluidos. Un sello laberíntico está compuesto de numerosas ranuras rectas que se ajustan en torno a un eje o dentro de una perforación, de forma tal que el fluido deba pasar por un largo y difícil camino para escapar. A veces poseen marcas en forma de tornillo en las porciones exterior e interior. Estas se encastaran de manera de definir el camino largo característico necesario para disminuir la fuga de fluido. En el caso de sellos laberínticos en ejes que rotan, debe existir un huelgo muy pequeño entre los bordes del laberinto y la superficie sobre la cual se deslizan.

Los sellos tipo laberinto de ejes rotatorios permiten obtener características de sellado sin necesidad que las dos superficies entren en contacto, para ello se controla el paso del fluido a través de varias cámaras mediante la acción de la fuerza centrífuga, como también mediante la formación de diversos vórtices en sitios predeterminados. A velocidades mayores más elevadas, las fuerzas centrífugas, obliga al fluido a desplazarse hacia afuera alejándose de los canales. En forma similar, si las cámaras del laberinto han sido diseñadas en forma correcta, todo el líquido que se ha escapado de la cámara principal, queda retenido en la cámara laberíntica, donde se lo fuerza a desarrollar un movimiento de vórtice. Este movimiento ayuda a prevenir la fuga del fluido, y también la ayuda a repeler otro fluido. A causa de de que los sellos laberínticos no requieren que las dos superficies a sellar estén en contacto, los mismos no sufren desgaste mecánico.

Las turbinas utilizan sellos laberínticos, ya que los mismos no generan fricción, lo cual es altamente conveniente cuando se deben desarrollar elevadas velocidades de rotación.

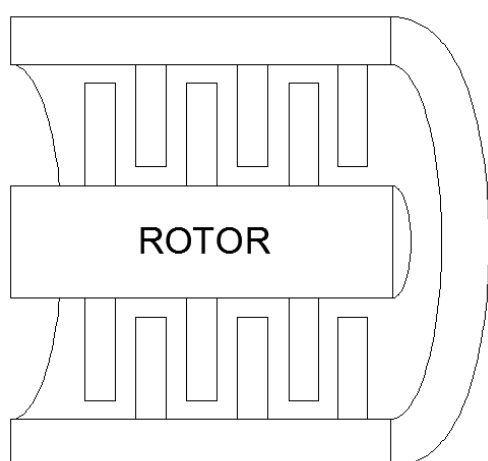


Figura 40. Esquema de un sello Laberíntico.

8.6.2.12 VIRADOR

El sistema virador consiste en un motor eléctrico o hidráulico (normalmente el segundo) que hace girar lentamente la turbina cuando esta no está funcionando. Esto evita que el rotor se curve, debido a su propio peso o por expansión térmica, en parada. La velocidad del sistema es muy baja (varios minutos para completar un giro completo del rotor), pero se vuelve esencial para asegurarse la correcta alineación del rotor. Si por alguna razón el sistema se detiene (avería del rotor, avería de la turbina, inspección interna con montaje) es necesario asegurar que, antes de arrancar, estará girando varias horas con el sistema virador.

8.6.2.13 COMPENSADOR

Es el elemento de unión entre la salida de la turbina y el resto de la instalación (generalmente las tuberías que conducen al condensador o el propio condensador). Ya que la carcasa de la turbina sufre grandes cambios de temperatura, este elemento de unión es imprescindible para controlar y amortiguar el efecto de dilataciones y contracciones.

Según la forma de obtener la energía se debe distinguir entre turbinas de acción y reacción. A partir de esa distinción se procederá a la selección de una turbina de contrapresión o una turbina de condensación según las condiciones del fluido de trabajo.

Ahora se distinguirán el concepto de turbina de acción y de reacción.

8.6.3 TURBINA DE ACCIÓN

Las turbinas de acción transforman la energía de la presión del vapor en velocidad en las toberas y el impulso del vapor a velocidad es el que mueve el rotor.

En las turbinas de acción el vapor pasa a través de las boquillas y alcanza las palas, estas absorben una parte de la energía cinética del vapor en expansión, lo que hace girar la rueda y con ella el eje al que está unida. La turbina está diseñada de forma que el vapor que entra por un extremo de la misma se expande a través de una serie de boquillas hasta que pierde la mayor parte de su energía interna.

Las turbinas de acción habituales tienen varias etapas, en las que la presión va disminuyendo de forma escalonada en cada una de ellas. El objetivo de los escalonamientos en las turbinas de vapor es disminuir la velocidad del rodete conservando una velocidad de los álabes próxima al valor óptimo con relación a la velocidad del chorro de vapor, con lo que se consigue aumentar la eficiencia.

8.6.4 TURBINA DE REACCIÓN

En las turbinas de reacción, hay diferente presión a ambos lados de las ruedas de los álabes y esto es lo que impulsa el rotor. Mientras discurre el vapor entre los



álabes móviles, disminuye su presión puesto que el espacio entre los álabes es variable.

En ellas se produce un efecto parecido al que sustentan los aviones. En las dos caras del ala de un avión hay una diferencia de presión, debido a la forma de las mismas, que induce a una diferencia de velocidades y que dan como consecuencia la diferencia de presiones antedicha.

La mayor parte de las veces los modelos son mixtos constando, primero de una rueda de acción, seguido de otras de reacción. Por lo general, las turbinas pequeñas son de acción y las turbinas grandes son de reacción o mixtas.

Generalmente las turbinas de reacción tienen mejor rendimiento.

Ahora como ultima distinción según el proceso se diferenciará entre la turbinas de contrapresión y las de condensación.

8.6.5 TURBINA DE CONTRAPRESIÓN

Cuando se dispone de vapor de calidad suficiente y el sistema presenta una demanda de vapor de procesos, puede turbinarse el vapor para generar electricidad y descargarlo a una presión suficiente como para atender a la alimentación de los procesos. Este tipo de turbinas se conocen como turbinas de contrapresión, porque descargan a una presión superior a la atmosférica.

Por lo general, las turbinas de vapor de presiones inferiores a 18 bar y 300 °C, se construyen de fundición y para operaciones de mayores exigencias de presión y temperatura se construyen de acero. En caso de las centrales geotérmicas, en el cual puede haber erosión se busca adaptarlas para aumentar su resistencia a fatiga.

Las disposiciones constructivas principales aplicadas a las máquinas pequeñas son sencillas, pues llevan cojinetes de anillos, topes de cojinetes de bolas, estanquidad por anillos de carbono, regulador de acción directa, orificios de admisión y de escape en el cuerpo inferior.

En este tipo de turbinas, la utilización de presiones elevadas implica la utilización de un armazón doble, un mayor espesor de los conductos de alimentación y un elevado número de puntos de estanqueidad

Para potencias inferiores a 1 MW consiste principalmente en una rueda Curtis, efectuándose el accionamiento del alternador mediante un reductor de engranajes. Para potencias entre 1 MW y 3 MW la turbina es de tipo mixto, con un escalonamiento en cabeza de acción simple, o de rueda Curtis, seguido de un grupo de coronas de reacción, el accionamiento del alternador se efectúa mediante un reductor, pudiendo alcanzar en la turbina una velocidad de giro de unos 10 rpm aproximadamente. Cuando la potencia es superior a 3 MW el accionamiento del alternador se realiza mediante acoplamiento directo (3 rpm); la turbina es siempre de tipo mixto, acción-

reacción; en las unidades más potentes, las características en la admisión pueden llegar a los 150 bar y 550 °C.

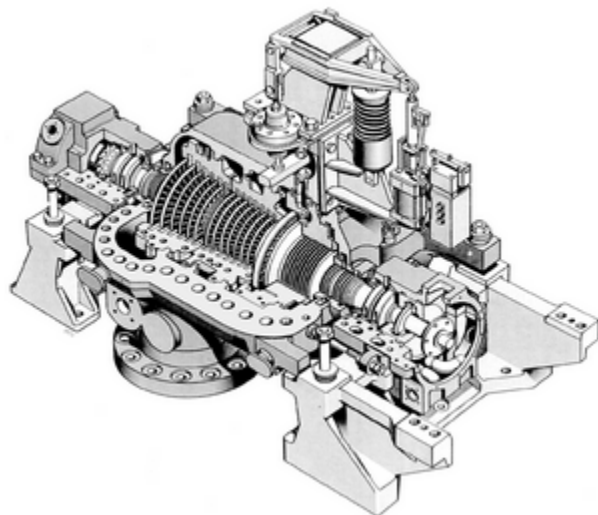


Figura 41. Sección de turbina contrapresión [2]

8.6.5 TURBINA DE CONDENSACIÓN

Son las más utilizadas en las centrales geotérmicas. La turbina descarga en un condensador que fija la temperatura de condensación del vapor expulsado y, en consecuencia, la presión, puesto que deben respetarse las condiciones de equilibrio líquido-vapor saturado.

En estas turbinas, la temperatura del condensador suele situarse entre los 60 y 40 °C; lo cual obliga a mantener, en el condensador, una presión inferior a la atmosférica, situada entre 0,2 bar y 0,07 bar absolutos. Para mantener el condensador en depresión suelen adoptarse estas soluciones: bomba de extracción, depresión por columna de agua o extracción mediante eyector de vapor.

Para las turbinas de alta presión se justifica el uso de doble carcasa y de los portatoberas. La carcasa consta de dos elementos unidos mediante bulones, siendo, en general, el elemento de Baja presión de fundición y el de alta presión de acero moldeado; la parte de baja presión de la máquina está sujeta por su fondo de escape a una placa de cimentación, mientras que la parte de alta presión puede deslizarse sobre su apoyo mediante un cojinete de bancada.

Este tipo de turbinas se suelen dividir en un cuerpo de alta presión y un cuerpo de baja presión de dos flujos. La disposición de dos cuerpos facilita su construcción cuando el número de escalonamientos es elevado, o cuando no se puede evacuar el vapor en el último escalonamiento a través de una sola corona, debido a un vacío del orden de 0,04 bar o menos, o a que su volumen es grande, o a las dos causas a la vez. Las dimensiones de las últimas coronas se limitan por razones de resistencia mecánica.

Si la presión de admisión es del orden de los 100 bar y la temperatura de la admisión y del recalentamiento intermedio es del orden de los 550°C, la construcción puede ser de tres cuerpos Alta Presión, Media Presión o (Media Presión - Baja Presión), y Baja Presión. El cuerpo de Alta Presión puede estar constituido por una rueda Curtis situada en cabeza, o por una serie de escalonamientos de acción, en los que el vapor vivo puede entrar a la parte media del cuerpo de Alta Presión, y se expande en la corona de cabeza y en los escalonamientos de acción antes del recalentamiento intermedio; los cuerpos de (Media Presión-Baja Presión) y de Baja Presión están alimentados con doble flujo.

Para presiones mayores del vapor y recalentamiento intermedio, se utilizan turbinas de cuatro cuerpos, un cuerpo de Alta Presión con flujo simple, un cuerpo de Media Presión de doble flujo y dos cuerpos de Baja Presión de doble flujo.

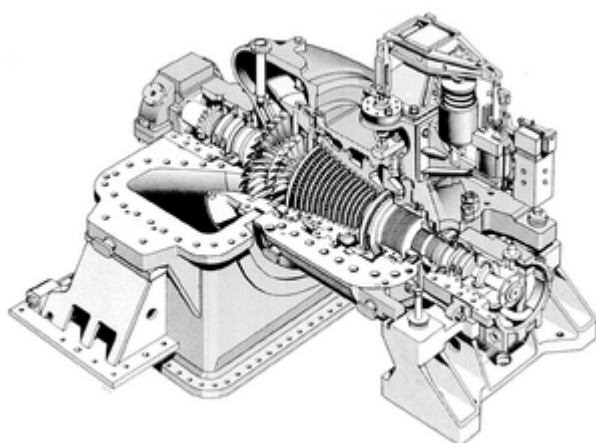


Figura 42. Sección de turbina de condensación [2]

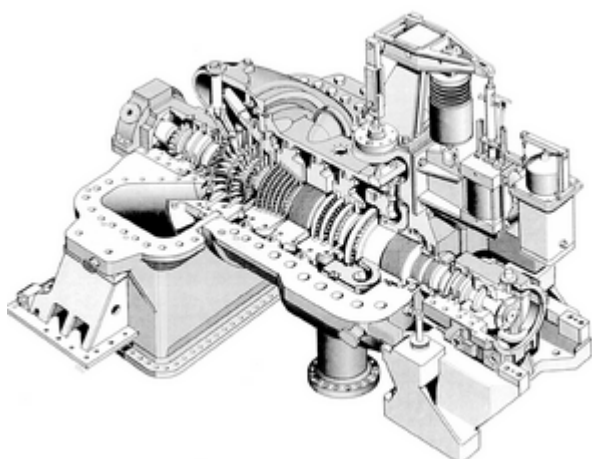


Figura 43. Sección de turbina condensación con extracción de vapor [2]

8.6.6 ELECCIÓN ENTRE UNA TURBINA DE CONTRAPRESIÓN Y UNA TURBINA DE CONDENSACIÓN

Este apartado quiere mostrar a grandes rasgos el porqué de la elección de un tipo de turbina u otra.

Imaginase un yacimiento geotérmico en España de vapor agua de 152 °C (5 bar de presión aproximadamente) el cual el vapor de agua que entre en la turbina tendrá un título de vapor de 1. El flujo másico será de 1 kg/s

Las turbinas de contrapresión una de sus características es que el vapor de agua sale a una presión mayor a la atmosférica. La presión de salida suele ser entorno los 1,5 bar. Además para hallar la potencia eléctrica obtenida de la turbina se considerará unos rendimientos típicos de 90 % el isentrópico, 80% el mecánico y 75% el eléctrico.

$$W_{turbina} = \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_e \cdot m_{vapor_agua} \cdot (h_1 - h_2)$$

La entalpía del vapor de agua a 5 bar $h_1 = 2748,7 \frac{kJ}{kg}$ y la presión de 1.5 bar $h_2 = 2693,6 \frac{kJ}{kg}$

$$W_{turbina} = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 1 \frac{kg}{s} \cdot \left(2748,7 \cdot \frac{kJ}{kg} - 2693,6 \frac{kJ}{kg} \right) = 29,8 kW$$

Entonces para la misma situación utilizamos una turbina de condensación se caracteriza por alcanzar en la salida presiones por debajo de la atmosférica. unos valores comunes de presiones son entre 0,2 bar y 0,07 bar. Para este ejemplo consideraremos una presión de 0,2 bar.

Considerando los mismos rendimientos y teniendo en cuenta que la entalpía a 0,2 bar es de $h_2 = 2609,7 \frac{kJ}{kg}$.

$$W_{turbina} = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 1 \frac{kg}{s} \cdot \left(2748,7 \cdot \frac{kJ}{kg} - 2609,7 \frac{kJ}{kg} \right) = 75,1 kW$$

Como podemos observar la potencia obtenida por la turbina de condensación es 2,5 veces mayor en igual condición de funcionamiento, por tanto es claro que para aumentar la relación de expansión del vapor es mejor utilizar una turbina de condensación.

Las turbinas de contrapresión son verdaderamente más útiles cuando el vapor que entra en la turbina tiene una presión de unos 150 bar.

8.7 BOMBAS HIDRAÚLICAS

Dentro de una central geotérmica, se ha hablado de lo importante que es el fluido en estado gaseoso para poder obtener energía mecánica a través de su energía cinética. Pero cuando el fluido pasa a estado líquido se debe prever de algún medio para poder desplazarlo.

Existen dos lugares fundamentales donde es necesario las bombas hidráulicas, a la salida del fluido líquido del condensador y para la recirculación del líquido refrigerante de la torre de refrigeración. El transporte del líquido condensado es necesario para no inundar los condensadores y así poder transportar el líquido hasta el yacimiento. El no inundar el condensador permite que este no tenga problemas de funcionamiento ya que su presión no aumentaría y podría seguir absorbiendo el vapor con la eficiencia a la que sea destinado. Además el transporte del fluido en estado líquido es una mejor elección. En caso de avería es más fácil de detectar y se sabe con mayor seguridad el recorrido que sigue el mismo. Otra bomba importante es la utilizada para transportar el agua refrigerada al condensador, ya que así es como se consigue el intercambio de calor en las centrales geotérmicas.

En este apartado se centrará en las bombas utilizadas para el transporte del líquido al yacimiento. Como la central seleccionada es de EGS y además el fluido de producción sacado del yacimiento estará en un estado saturado, no es aconsejable poner una bomba hidráulica, ya que esta sufriría un fenómeno de cavitación. Por ello en este tipo de centrales se colocan bombas para introducir el fluido de condensación de la central (además de extracción del líquido de separador) de nuevo al yacimiento. EGS es muy importante este hecho ya mediante el estudio de las fracturas creadas dentro del yacimiento y de la presión de trabajo que se quiera obtener del yacimiento se puede impulsar el fluido a mayor o menor presión.

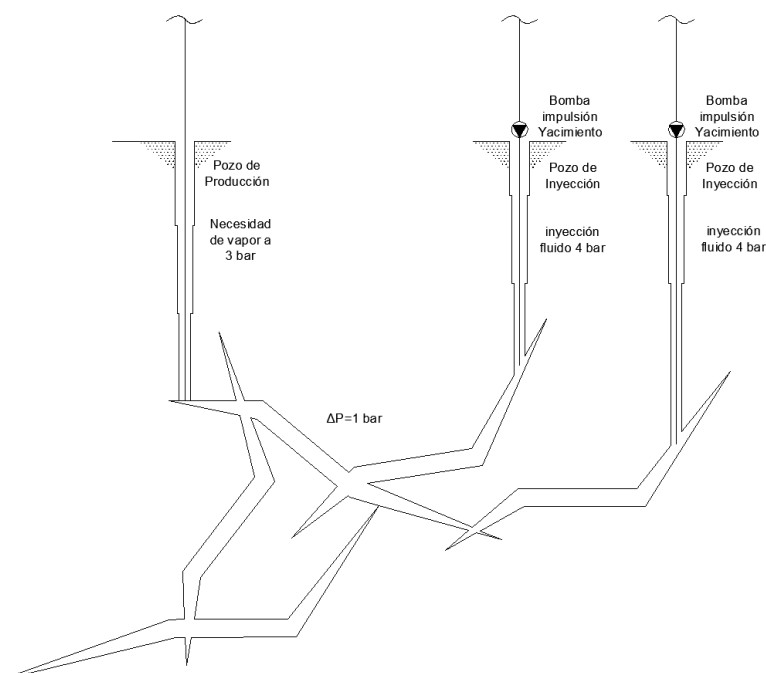


Figura 44. Característica de bombeo de líquido en EGS



En aplicaciones de bombeo de agua en geotermia las máquinas hidráulicas más utilizadas son las bombas verticales (lineshaft) y bombas sumergibles.

Este tipo de elementos del que se componen las bombas de este tipo son:

8.7.1 PARTES PRINCIPALES

8.7.1.1 ACCIONADOR

Es elemento que arranca y mantiene el funcionamiento hidráulico de una bomba. Se pueden utilizar varios tipos de accionadores; sin embargo, los motores eléctricos son los más comunes. Los accionadores se pueden distinguir de manera global en dos:

- Accionadores de ejes huecos: el eje del cabezal se extiende por el tubo en el centro del rotor y se conecta al accionador por medio de un ensamble del embrague por encima del accionador.
- Accionadores de ejes sólidos: el eje del rotor es sólido y se proyecta por debajo de la base del montaje del accionador. Este tipo de accionador requiere un acople ajustable conectado a la bomba.

8.7.1.2 ENSAMBLE DEL CABEZAL DE DESCARGA

El cabezal de descarga soporta al accionador y al cuerpo de tazones, así como también provee la conexión de descarga en la mayoría de los casos.

El montaje del sello de eje se localiza en el cabezal de descarga para sellar el eje en el extremo de salida de la cámara de fluidos. El sello de eje generalmente es un ensamble de sello mecánico o una caja de empaquetadura con un eje de línea autolubricado o una caja de empaquetadura con un eje de línea encerrado.

8.7.1.3 ENSAMBLE DE LA COLUMNA

El ensamblaje de la columna consiste en la tubería de columna, la cual conecta el ensamblaje de tazones al cabezal de descarga y conduce el fluido bombeado al cabezal de descarga. Protege y apoya el eje, y puede contener los cojinetes.

la columna apoya el ensamble del eje y puede ser:

- Una construcción de eje de línea abierto que utiliza los fluidos bombeados para lubricar los cojinetes de línea.
- Una construcción de eje de línea encerrado que tiene un tubo envolvente alrededor del eje de línea y utiliza aceite u otro fluido para lubricar los cojinetes del eje de línea.



8.7.1.4 ENSAMBLE DE CUERPO DE TAZONES

El ensamble del cuerpo de tazones consiste en montar en forma rígida los impulsores sobre el eje de la bomba acoplados a un motor eléctrico. Los impulsores son ruedas encapsuladas con múltiples aspas difusoras y generalmente están recubiertas para cumplir con los requerimientos hidráulicos.

8.7.1.5 COLADORES DE ASPIRACIÓN

Las bombas "lineshaft" también se pueden filtrar con coladores para evitar que entren partículas extrañas a la bomba. El tipo de los coladores y el tamaño de la malla depende de la aplicación.

8.7.1.6 IMPULSOR

Las bombas "lineshaft" están provistas con los tipo de impulsores encerrados, abiertos o semi-abiertos. Los impulsores son del tipo de capacidad baja, media y alta, diseñados para una máxima cobertura de todas las aplicaciones de las bombas "lineshaft". Los impulsores están encapsulados y elaborados para que coincida y brinde la terminación de superficie que se requiere para obtener las características hidráulicas. Los impulsores están dinámicamente balanceados y colocados en posición sobre el eje por medio de una buje cónico de seguridad coniforme o un anillo partido y una chaveta.

8.7.1.7 PRENSAESTOPAS

Algunas bombas verticales se instalan con cajas de empaquetadura. En estos casos, las cajas de empaquetadura generalmente están adecuadas para trabajar a una presión de hasta 20.7 bar (300 psi). La principal función del prensaestopas es mantener la estanqueidad de la bomba, manteniendo ajustado el eje con la empaquetadura.

8.7.1.8 EMPAQUETADURAS

Aseguran el mantener los líquidos dentro de la bomba. Suelen ser de abesto, grafito, pñte, etc.

8.7.1.9 SELLOS MECÁNICOS

Los sellos mecánicos son dispositivos creados para evitar por completo las fugas. Normalmente tienen el mismo sitio de ubicación de las empaquetaduras convencionales.

Los sellos mecánicos tienen las siguientes ventajas sobre las empaquetaduras:

- Evita totalmente el goteo por lo tanto no se pierde sustancia bombeada.
- Las bases de las bombas son más fáciles de limpiar.
- Los costos de empaquetadura se reducen.

Estos son las características principales de las bombas sumergibles y las verticales, ahora se procederá a distinguirla cualitativamente como tecnicamente para seleccionar la mejor para nuestra central

8.7.2 BOMBAS VERTICALES "LINESHAFT"

En este tipo de bombas, el impulsor es accionado desde la superficie, mediante un motor que mueve la columna, que prolonga hasta enlazar con el eje del rotor.

Sus características más notables son las siguientes:

- la eficiencia hidráulica, por etapa es del orden del 70% al 80% y la velocidad de rotación usual es de 1460 rpm (motor bipolar de jaula de ardilla)
- El motor trabaja frío, es accesible desde la superficie y tiene un buen rendimiento, pero presenta pérdidas mecánicas elevadas, debido al rozamiento mecánico en barra de transmisión.
- La temperatura máxima de trabajo oscila los 250 °C y la máxima profundidad los 600 m.
- Debido a que la transmisión de energía mecánica se realiza mediante una barra metálica, el trazado del pozo puede ser relativamente recto.
- El tiempo de instalación y desmontaje de la bomba es dilatado.
- El precio del equipo de bombeo es bajo.

La barra de transmisión pasa por el interior de un tubo guía (columna), concéntrico a la tubería de descarga, de cuyo extremo se suspende la bomba. De tramo en tramo, a lo largo de la tubería, se sitúan los anillos de guía encargados de mantener la barra y el tubo guía (anillos de desgaste), centrados respecto al tubo de bombeo.

El impulsor está constituido por un conjunto de etapas que constan de un rotor de circulación axial y estator con álabes directores; las etapas se conectan entre sí, mediante bridas con tornillos de sujeción. El número de etapas depende de la presión de impulsión deseada.

La boca de aspiración suele equiparse con un filtro, para evitar el paso de partículas sólidas de gran tamaño y, opcionalmente, con una válvula de corte y un cono de fijación.

En caso de temperaturas altas debe tenerse en cuenta la dilatación axial a la hora de funcionamiento y diseño.

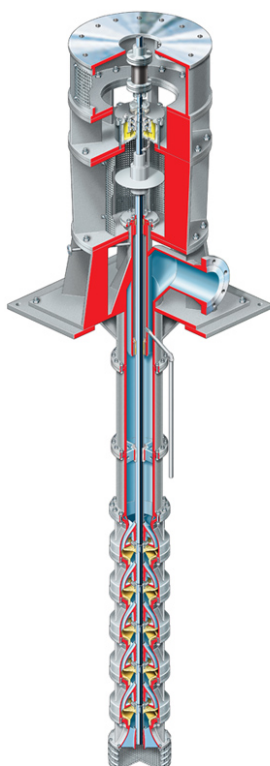


Figura 45. Molten Salt VTP Pump [29]

8.7.3 BOMBA SUMERGIBLE (ESP)

En este tipo de bomba el impulsor es accionado directamente por el motor eléctrico, que puede estar sumergido y se alimenta mediante un cable eléctrico, que llega al motor, desde la superficie. Respecto de las bombas anteriores no tienen inconvenientes derivados de la necesidad de instalar un árbol de transmisión muy largo, pero su temperatura de viene limitada por la temperatura de trabajo del motor.

- La eficiencia hidráulica por etapa es análoga a las anteriores, pero su velocidad suele ser el doble (motor monopolar de jaula de ardilla).
- El rendimiento suele ser un poco más bajo ya que las condiciones de funcionamiento son más agresivas en el funcionamiento que un una bomba vertical. Además su motor no es accesible normalmente. Tienen la ventaja de poder trabajar a mayores profundidades y a más temperatura que las verticales.
- Toleran desviaciones, en el trazado del pozo .
- El tiempo de instalación y desmontaje es corto.
- El precio del equipo de bombeo es elevado y aumenta a medida que las condiciones de trabajo, profundidad y temperatura se hacen más exigentes.

El motor, cuelga de la parte inferior de la bomba y , el conjunto está suspendido de la cabecera mediante una tubería; el cable eléctrico transcurre hasta el motor y el resto de la conducción es análoga a las bombas verticales.



Figura 46. Byron Jackson SUBM Geothermal Deep-Well Submersible [29]

Entonces la elección más favorable sería la ESP, porque aunque impulse menos caudal, podemos obtener mayor presión disponible. Además las condiciones de aspiración no son tan agresivas, ya que la utilizaremos para impulsar el fluido al yacimiento en vez de aspirarlo. Además si se necesita más caudal se pueden poner varias bombas en paralelo absorbiendo de la piscina de condensados de la central.

8.8 CALDERA DE BIOMASA

La energía geotérmica al igual que la mayoría de las energías renovables cuesta integrarla en la sociedad, ya que su instalación es cara y además suele ser menos productiva. En relación a la obtención de electricidad que las producciones a través de combustibles fósiles suelen ser más baratas y además se obtiene más energía. Pero está claro que los combustibles fósiles no son de duración infinita además de ser contaminantes. Por eso se está empezando a fomentar el uso de energía alternativas.

Uno de los problemas más importantes de la obtención de la energía eléctrica a través de la energía geotérmica es la falta de presión y temperatura. Una vez se tiene el yacimiento de explotación si este no es capaz de abastecer la demanda energética o su producción es irregular se terminará por desestimar.

Las soluciones para este problema en las centrales de simple flash son utilizar regeneración o recalentamiento. Esto supone una inversión mayor en la central y además no garantiza al cien por cien que la central tenga una producción constante.

Es cuando nos surge la idea de un recalentamiento del ciclo Rankine pero con un caldera. Esto asegurará una producción regular. Pero el problema es que utilizar combustible fósil para producir energía nos lleva a depender otra vez de este tipo de combustible con fecha de caducidad. Es aquí cuando se llega la idea de utilizar una caldera de biomasa. La cual tiene la ventaja de obtener su "combustibles" de desechos orgánicos y de cultivos fundamentalmente.

Además adelantaremos el hecho de que a la biomasa se la mezclará con un porcentaje de carbón nacional, el cual no es muy favorable en la economía española dado su alto contenido en azufre, hace que se importe en gran medida de otros países. Pero en un pequeño porcentaje mezclado con la biomasa aumenta el poder calorífico de la biomasa y además favorece a la economía española.

Por tanto, es importante escudriñar las diferentes técnicas de combustión de biomasa. Los parámetros fundamentales que condicionan la elección de una u otra son la humedad y la granulometría del residuo (es decir el tamaño a que se reduce la biomasa).

8.8.1 TECNICAS PARA COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA

- Combustión en masa: es el tipo de combustión de hogar rotativo o en parrilla de tipo vibrante. La biomasa, que puede ser de gran tamaño, se deposita en la parrilla o lecho donde permanece hasta completar su secado o combustión. Es adecuada para combustibles de alta contenido de humedad y que generan residuos de composición variable. En este tipo de combustión, el combustible comparativamente no necesita demasiados tratamientos previos, por los que presenta notables ventajas de versatilidad aunque es un sistema caro.
- Combustión en suspensión: el combustible es lanzado al hogar a través de un quemador y se quema en suspensión, sin que la materia toque las paredes o se deposite en el fondo del hogar. Es un sistema adecuado para combustibles de bajo contenido en humedad y un estrecho rango de distribución de tamaños. El sistema suele ser transportado por un sistema neumático.
- Combustión semi-suspensión: en este tipo de combustión de materia se deposita sobre una parilla realizándose la combustión de la materia ligera en suspensión y la de la parte pesada en la parilla. El combustible debe tener un tamaño medio típico de 3-50 mm y no debe presentar problemas de aglomeración.

Como se aprecia hay una gran diversidad de sistemas de combustión de biomasa en calderas. Pero entre los más usados se pueden señalar los siguientes:

8.8.2 SISTEMAS DE PARRILLA

La parrilla es una estructura metálica destinada a mantener el combustible en el hogar y facilitar el paso del aire primario de combustión. Se construyeron mediante piezas de fundición de formas diversas, a través de las cuales circula el aire de

combustión. El área total de las aberturas del emparrillado varía entre los 20 y el 40% de la superficie total de la parrilla y depende del tipo de biomasa empleada.

Las parrillas han tener la posibilidad de evacuar las escorias , para lo que se disponen con un cierto grado de inclinación y algún sistema que facilite el movimiento hasta el punto más bajo, desde donde son extraídas. Este es el método de combustión más comúnmente empleado.

Así pues, la parrilla constituye la solera del hogar y proporciona la superficie sobre la cual se queman las partículas de combustible más grandes. Puede estar refrigerada por aire o por agua, en cuyo caso llevan soldados en sus parte inferior una serie de tubos por los cuales circula el agua de refrigeración. Además, se debe estar preparada para la extracción automática y continua de cenizas.

Existen diversos modelos de parrillas, en función del tipo de biomasa sólida que se trate y sobretodo dependiendo de la humedad. Así, se pueden distinguir los siguientes grupos:

- Hogares de parrilla fija: son los indicados para combustibles biomásicos en los que predominen las partículas pequeñas y de baja humedad. La combustión se realiza de forma heterogénea, ya que el combustible apilado sobre la parrilla se encontrará en diferentes estados de combustión.
- Hogares de parrilla inclinada: adecuados para biomasa de granos y humedades mas variables que tienden a formar gran cantidad de cenizas. En este tipo de hogares los residuos se desplazan deslizando a lo largo de la parrilla, por lo que la combustión resulta más homogénea que en el caso anterior. Además, la retirada de las cenizas se suele realizar de formar relativamente fácil por medios mecánicos, ya que a medida que se producen van cayendo de la parrilla a la parte inferior (en otras palabras el cenicero).

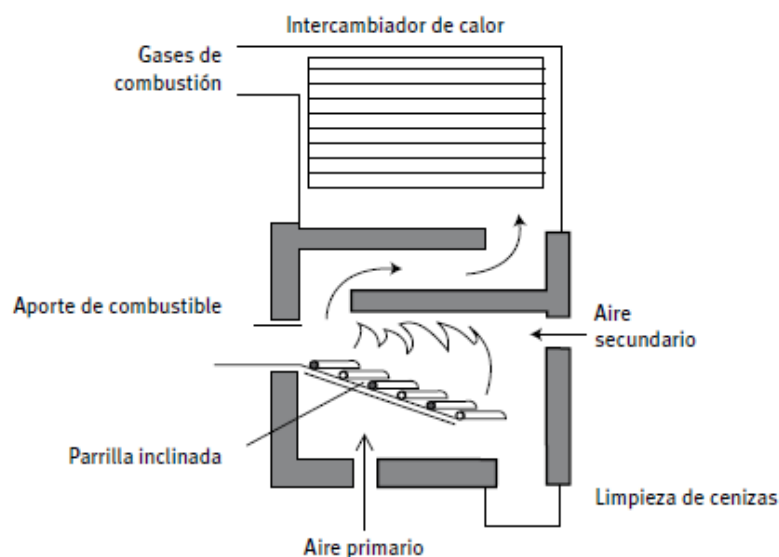


Figura 47. Caldera de Biomasa de parrilla inclinada [15]

- Hogares de parrilla móvil: apropiados para biomásas con una elevada fracción de inertes, de forma que en su combustión se crea una gran cantidad de cenizas. Está provistos de un sistema tractor que permite el movimiento de la parrilla y la descarga continua de las cenizas.
- Hogares de parrilla vibratoria: permite una descarga automática e intermitente de las cenizas. El tiempo de vibración y el de reposos se pueden ajustar en función de las características del combustible. La duración de la vibración suele variar entre cuatro y diez segundos según la carga de la misma y el tipo de combustible. Este tipo de parrilla suele tener una refrigeración por agua.

8.8.3 HOGARES ROTATIVOS

Son hogares de geometría cilíndrica los cuales utilizan un mecanismo y accionamiento de un motor por rotación. Gracias a la variación de la velocidad angular (de rotación) del horno se modifica el tiempo de permanencia del combustible, lo que resulta un método realmente eficiente para el control de la combustión.

Este tipo hogares se utilizan para diversos tipos de biomasa y especialmente para residuos muy heterogéneos y con amplios márgenes operativos.

8.8.4 QUEMADORES DE TORNILLO

Es un sistema de combustión de lo más frecuentes en instalaciones pequeñas y de baja potencia 7 MW. se utiliza para residuos sólidos de hasta un 35% de humedad y granos de hasta 30 mm.

La combustión se hace en un volumen restringido, lo que provoca elevadas temperaturas de llama y por tanto escoria.

8.8.5 CÁMARAS TORSIONALES

Este tipo de calderas tiene un tipo de quemador diseñado para quemar combustibles sólidos pulverizados, de tamaños de entre 0,1-30 mm (cáscaras de semilla de girasol, de algodón serrines, orujos, etc), ya que el comburente debe poder ser transportado neumáticamente. Además, no son recomendables humedades superiores al 30%.

El combustible se introduce a presión en la cámara de combustión mediante un sistema neumático y de forma que adopta un movimiento de helicoidad dentro de la cámara, al mezclarse con el aire de combustión. Las partículas de combustible se mantienen en suspensión aerodinámica, produciéndose en primer lugar un proceso de volatilización. El residuo carbonoso que queda se concentra en la periferia de la cámara, donde existe una mayor presión parcial de oxígeno, lo que permite la rápida conversión de estas partículas carbonosas a la fase gaseosa.

8.8.6 COMBUSTIÓN DE LECHO FLUIDO

El lecho fluido en sus diferentes variantes es una tecnología de combustión limpia, que se viene usando de forma creciente para resolver problemas de eliminación de residuos de todo tipo, con aprovechamiento energético y respetando los límites medioambientales establecidos.

En una caldera de lecho fluido típica, la biomasa, junto con el material inerte del lecho (arena, alúmina o cenizas) y un catalizador (caliza) se mantienen en suspensión por medio de una corriente de aire. Es posible controlar los parámetros que influyen en la combustión: turbulencia, tiempo y temperatura (en el hogar de 800°C-900°C). Mediante estos controles se aprovecha el calor generado a una temperatura más baja que en una caldera convencional, pero sin pérdida de eficiencia. Con estas temperaturas se está por debajo de la formación de emisiones contaminantes con los óxidos de nitrógeno y también se evitan problemas de sintonización y formación de escorias asociados con las calderas convencionales.

La combustión en lecho fluido con recuperación de energía está considerada hoy en día como una de las alternativas más convenientes para la valoración de la energía de la biomasa. La turbulencia en el volumen del combustor, conjuntamente con el efecto torbellino y la inercia térmica del material del lecho dan lugar a una combustión completa, controlada y uniforme.

Estos factores son claves para maximizar el rendimiento y controlar las emisiones. El alto rendimiento de los combustores de lecho fluido los hace particularmente adecuados para manejar combustibles problemáticos, con bajos contenidos energéticos y altos contenidos de humedad.

Desde el punto de vista de operación se puede distinguir en dos grupos:

- Lechos fluidos atmosféricos, que operan a presión atmosférica
- Lechos fluidos a presión, que operan a presiones entre 5 y 20 bar.

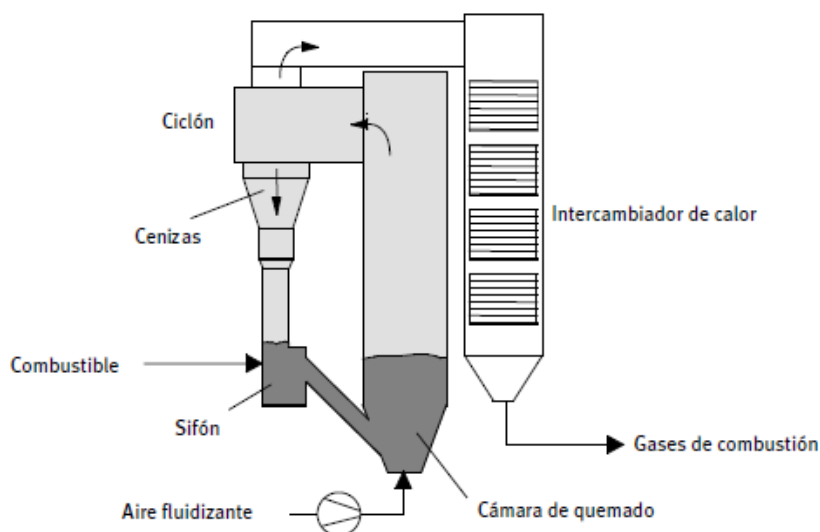


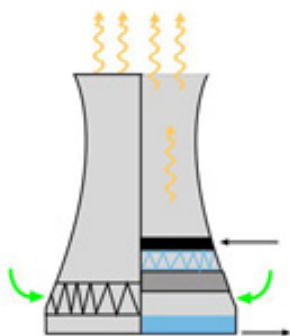
Figura 48. Esquema de caldera de lecho Fluidizado [15]

Con las calderas mencionados podemos hacer una elección de manera cualitativa. Por tanto, lo más interesante sería escoger una caldera de lecho fluidizado. Seleccionamos este tipo de caldera ya que es la caldera de cuyas emisiones o agresión contra el medio ambiente es menor. Además es la caldera que permite mejor control de la temperatura, lo cual nos interesa para mantener una producción regular en la central geotérmica. Además de admitir un mayor rango de combustibles de biomasa para trabajar.

8.9 TORRE DE REFRIGERACIÓN

En este trabajo no se va adentrar en las torres de refrigeración ya que para las centrales geotérmicas ya que sólo la mencionaremos para aportar el refrigerante al condensador y no nos afectaría al recto del cálculo de la central.

Sin embargo, las torres más utilizadas son de tiro natural, la transferencia de calor es tipo de contacto directo. Los rociadores expulsan el líquido procedente de la piscina de condensados, al caer cae en una empaquetadura lo que aumenta el tiempo que haya transferencia de calor y además se hace pasar aire de tal forma que el líquido se enfríe y el aire se eleve debido a que aumenta su temperatura. Por último el condensado cae en la parte inferior de la torre de refrigeración (piscina) y se impulsa al circuito de refrigeración por bombas, pero en caso del que el vacío en el condensador sea grande se podría llegar a prescindir de esa bomba.

**Figura 49. Torre de refrigeración de tiro natural [12]**

9. CONDENSADOR

Los condensadores son aparatos en los cuales se condensa el vapor de escape procedente de las máquinas y/o turbinas, además de donde el aire y otros gases no condensables son evacuados de una forma continua. Dos de las ventajas que pueden conseguirse empleando condensadores en las turbinas de vapor de vapor:

Disminución de la presión de escape , con el consiguiente aumento de la energía utilizables. Es decir, cuando si reducimos la presión de escape estamos provocando una diferencia de presiones favorable.

$$\frac{dP}{dx} < 0$$

Ecuación 2. Diferencial de presión

Provocando un movimiento por diferencia de presiones de la zona de mayor presión (en la entrada de la turbina o máquina) a la zona de menor presión (en la entrada del condensador).

Como siguiente ventaja, hay una recuperación del condensado para utilizarlo como agua de alimentación para nuestro yacimiento geotérmico. Se busca volver al condensado , porque el transporte del fluido en este estado, provoca menos fugas y además es necesario para que la bomba que reinyecta el líquido en el yacimiento geotérmico. Si no estuviese en estado líquido tendríamos problemas de cavitación y además es más fácil que el fluido caiga al yacimiento por gravedad.

Es de vital importancia comprender en qué consiste la condensación entender los distintos componentes de los condensadores.

9.1 CONDENSACIÓN

La condensación es un proceso físico en que un fluido pasa de estado gaseoso a líquido. Es decir, cuando la temperatura de del vapor se reduce por debajo de su temperatura de saturación.

Otra forma de determinar la condensación desde un punto de vista más técnico es explicar que se produce al transferir calor a una sustancia gaseosa (calor que provoca aumento de temperatura , peno cambio de fase) hasta liberar el calor latente (calor a temperatura constante que existe en un cambio de fase) y así se obtiene el condensado.

La condensación depende entre otros factores de la presión y temperatura, para pasar de estado gaseoso a líquido. En la naturaleza a presión de un 1 bar o una atmósfera y a una temperatura menor de 100 °C se produce el fenómeno de la condensación.

La condensación es un proceso regido por la entropía y la energía. El estado líquido es más favorable desde el punto de vista energético y el gas es el estado más entrópico.

Se pueden distinguir diferentes tipos de condensación:

- Condensación homogénea: El vapor se condensa en forma de gotas suspendidas en una fase gaseosa para formar neblina.

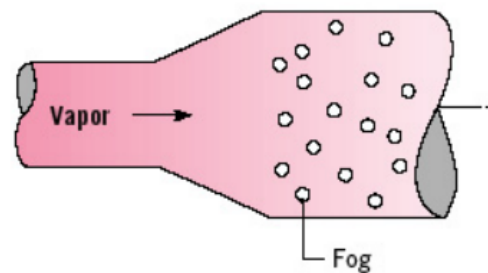


Figura 50. Condensación homogénea [17]

- condensación por contacto directo: Existe cuando el descenso de la temperatura de un vapor se produce por el contacto con un líquido frío. Se satura el gas a la vez que se le reduce la temperatura.

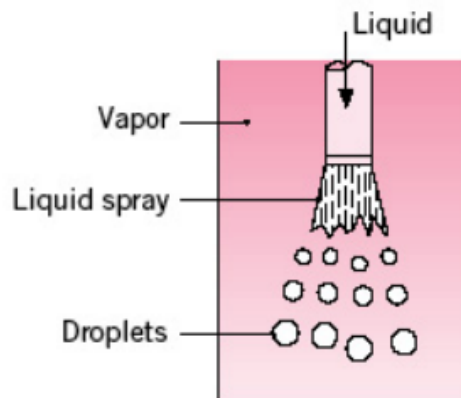


Figura 51. Condensación de contacto directo [17]

- Condensación en película: Es cuando una sustancia al condensarse moja la superficie formando sobre ella una película de espesor variable.

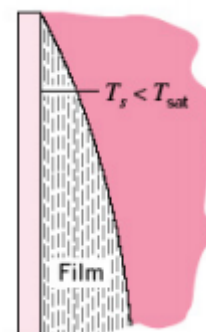


Figura 52. Condensación en Película [17]

- Condensación por gotas: Es tipo de condensación cuando el líquido no moja la superficie, es decir, las gotas formadas deslizan por la superficie y se separan de ella.

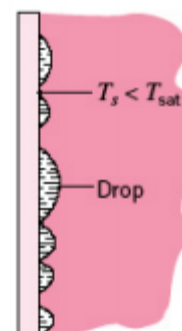


Figura 53. Condensación en Gotas [17]

9.2 CONDICIONES DE VACÍO

En un condensador la causa principal del vacío es la condensación del vapor. Esto es debido, a que el volumen específico del vapor es mucho mayor que el volumen específico del líquido.

Una forma de apreciar el concepto de vacío en la condensación es que el agua a una temperatura de 61 °C ocupa un volumen de 1 dm³, es decir, en un recipiente de un condensador de 1 m³ en el que en principio se introduce un gas que ocupará el mayor la totalidad del espacio del recinto al condensarse ocupa un 0.1% del recinto. Como se comprende esto genera una condición de vacío. Como consecuencia extra ayuda a absorber más vapor.

Debido a que el condensador está lleno de aire al comenzar el funcionamiento del condensador y cuando comienza a funcionar se va llenando de gases incondensables, es necesario un sistema de extracción de incondensables, con el cual se mantendrá las condiciones de vacío para las cuales ha sido diseñado el condensador.



Las condiciones de vacío favorecen una mayor expansión del vapor dentro de la turbina (más energía eléctrica), pero se debe tener especial cuidado cuando para que la construcción aguante las condiciones de vacío.

9.3 TIPOS DE CONDENSADORES

Se puede hacer la distinción más generalizada que es según su área de transferencia de calor. Por tanto existen dos tipos condensadores de superficie y condensadores de contacto directo.

9.3.1 CONDENSADORES DE SUPERFICIE

Los condensadores de superficies se rigen por el siguiente principio condensan un fluido de trabajo gracias a un fluido refrigerante, con el nunca se mezcla. Nunca se llegan a mezclar los fluidos porque existe una superficie de interfaz.

Dentro de los condensadores de superficie se pueden distinguir los refrigerados por aire o los refrigerados por agua. Dado que los condensadores de aire debe tener un área expuesta mucho mayor que un condensador de superficie de agua o depender de un ventilador que fuerce una corriente de aire que pasa a través de toda su superficie expuesta. Los condensadores refrigerados por aire no necesitan de una torre de refrigeración.

Los condensadores refrigerados por fluido líquido suelen ser refrigerados por agua, por dos sencillas razones: a presión atmosférica se encuentra en estado líquido y que es elemento muy barato como refrigerante ya que es muy abundante.

Los condensadores de vapor de las grandes centrales térmicas o de las centrales geotérmicas que utilizan condensadores de superficie, utilizan un diseño de condensador basado en haces de tubos dentro de una coraza que cubra tanto los haces como las diversas secciones en las que se divide un condensador de superficie.

Su funcionamiento consiste en pasar un fluido de trabajo por el interior de los haces de tubos e introducir un fluido refrigerante por el exterior de los tubos. Entonces debido a la transferencia de calor por convección (diferencia de temperatura entre el exterior de los tubos y el fluido refrigerante, además de la transferencia entre el interior del fluido del trabajo y la cara interior de los haces de tubos) y por conducción (transferencia de calor debido al paso de calor por el espesor del tubo) se produce un fenómeno de condensación.

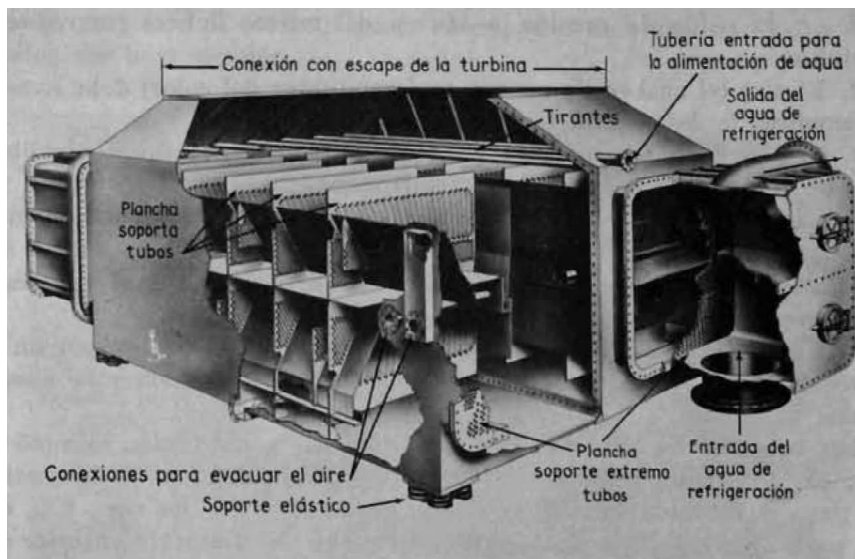


Figura 54. Corte ideal de un Condensador Foster Wheeler de doble Circulación [10]

Un condensador de superficie sus elementos principales sería los siguientes:

- **Cuerpo:** Suelen ser unos prismas rectangulares (generalmente de acero de carbono con titanio) Que tiene como función principal contener los haces tubulares, compuestos de los tubos, placas tubulares, placas soporte y demás elementos que realizan el intercambio.
- **Tubos:** Generalmente suelen ser de acero inoxidable. Sus medidas dependerán del área de transferencia necesaria entre el vapor y el fluido de trabajo. Condicionan las medidas del resto del condensador ya que están en el interior de la coraza y son los elementos fundamentales para la transferencia.
- **Placas tubulares:** Generalmente de Titanio, acero inoxidable 316L o acero inoxidable 317L. Se sitúan en ambos extremos del condensador, una por haz de tubos, a ellas van soldadas los tubos a la entrada, salida y retorno, y son las que comunican el haz de tubos con las cajas de agua.
- **Placas soporte:** Generalmente de acero de carbono laminado. Están situadas en el interior del condensador. Se colocan en paralelo con la misma separación a lo largo de todo el cuerpo. Van soldadas en el extremo a la chapa del cuerpo y apoyadas en tuberías en su parte inferior.
- **Pantalla de impacto:** Generalmente de Titanio, acero inoxidable 316L o acero inoxidable 317L. Está formada por tubos macizos que protegen los tubos de cada haz de gotas de agua u otros posibles impactos de flujos no controlados, sobre todo de las líneas de descarga de bypass, donde el flujo descargado es más dañino para los tubos del condensador.
- **Cuello de condensador:** Generalmente de acero de carbono. Une el cuerpo del condensador con la salida de la turbina. Su interior está arriostrado mediante tuberías huecas para darle rigidez y que no se deforme ante las presiones del interior.

- Sistema Bypass: se destina para las paradas, avería o para condiciones de funcionamiento. Así nos se deja que el flujo pase por el interior del condensador.
- Pozo de condensado: Generalmente de acero de carbono. Se sitúa en la parte inferior del cuerpo. Tiene las mismas dimensiones de ancho y largo del cuerpo y su función es almacenar el vapor condensado.
- Cajas de agua: Generalmente de acero de carbono. Colocadas a los extremos de los haces tubulares, a cada lado del condensador. Llevan las conexiones necesarias para la entrada y salida del agua de circulación. Por otro lado las cajas de retorno que permiten que el agua de circulación vuelva al extremo contrario del condensador.

Se rige el funcionamiento por la siguiente ecuaciones en los intercambiadores de calor.

$$Q = A \cdot U \cdot M_{LTD}$$

$$Q = cp \cdot m \cdot \Delta T$$

Donde:

Q = Potencia térmica del condensador.

A = Área de transferencia de calor.

U = Coeficiente de transferencia de calor.

M_{LTD} = Media logarítmica entre el fluido caliente y fluido frío.

ΔT = Diferencia de temperatura entre el interior de los tubos y el refrigerante.

cp = coeficiente de calor específico a presión constante.

m = gasto másico.

A su vez el coeficiente de transferencia de calor:

$$U = \frac{1}{R_t}$$

$$R_t = h_{refig} + R_{conducc} + h_{trab}$$

h_{refig} = coeficiente de convección del fluido refrigerante.

$R_{conducc}$ = Coeficiente de conducción a través del espesor del haz de tubos.

h_{trab} = coeficiente de convección del fluido de trabajo.

Con estas fórmulas se puede distinguir que para conseguir una potencia térmica deseada si se aumenta el área de transferencia no es necesario una diferencia

de temperaturas grandes o que a mayor diferencia de temperaturas se necesita mayor área de transferencia.

$$Q = A \cdot U \cdot \uparrow M_{LTD} \rightarrow \downarrow A$$

$$Q = A \cdot U \cdot \downarrow M_{LTD} \rightarrow \uparrow A$$

En las centrales térmicas se está más condicionado por las diferencias de temperaturas por lo cual se necesita un área de transferencia grande, como resultado sería numerosos haces de tubos de hasta 15 m con varios pasos por tubo.

A mayor número de tubos y mayor distancia de los mismos salen unos condensadores de tamaños gigantes. Lo que significa construcciones complejas y más difíciles de encontrar fugas. Además de ser más propensas a obstrucciones en caso de no utilizar fluidos trabajo más sucios.

Es de destacar que en análisis no se hablado de las velocidades del fluido , las fases de los líquidos o la disposiciones de los tubos para favorecer la transferencia, pero lo que se pretende es incidir a grades rasgos los factores más importantes a tener en cuenta en la transferencia de calor.

9.3.2 CONDENSADORES DE CONTACTO DIRECTO

Los condensadores de contacto directo se basan en la transferencia de calor por el contacto entre el refrigerante y el fluido de trabajo. La principal ventaja reside en que el área de transferencia entre el fluido de trabajo (vapor) y el refrigerante es la máxima posible, es decir, el área que abarca el vapor. Dado que no hay una superficie metálica entre el refrigerante y el vapor el coeficiente de transferencia es más alto, lo que favorece a un condensado en menor tiempo.

Los condensadores de contacto directo a diferencia de los superficiales, carecen de numerosos recorridos de tubería además que es relativamente fácil detectar las fugas y obstrucciones. Es necesario una mayor cantidad de refrigerante para condensar el vapor y además el fluido de trabajo se ve contaminado por el refrigerante, ya que se mezclan. Pero se compensa dando que los vacíos que se generan en los vasijas de este condensadores son más altos que en los condensadores de superficie, lo que significa que no se necesita (o sólo de manera auxiliar) bombas para inyectar el fluido en el interior del vasija.

Los condensadores de contacto directo o de mezcla, además se pueden distinguir entre los de tipo barométrico de bajo nivel. Los condensadores barométricos se sitúan en la parte superior de un tubo largo de descarga. El condensador está lo suficientemente por encima del punto de descarga del tubo como para que la columna de agua en el interior se compense de manera sobrada la diferencia de presión entre la presión del condensador (baja) y la atmósfera, de esta manera el agua al condensarse cae por gravedad a través de la tubería. La tubería está sellada en el fondo debido a que se introduce en un pozo de condensador. Se suele conectar la

vasija y la tubería del condensado mediante una pieza cónica de un ángulo de unos 30° . Los condensadores de bajo nivel son aquellos que utilizan una bomba para desalojar el condensado del interior de la vasija.

Según el tipo de vasija que tenga el condensador se puede distinguir los siguientes tipos:

9.3.2.1 CONDENSADOR A CONTRACORRIENTE DE TIPO SPRAY

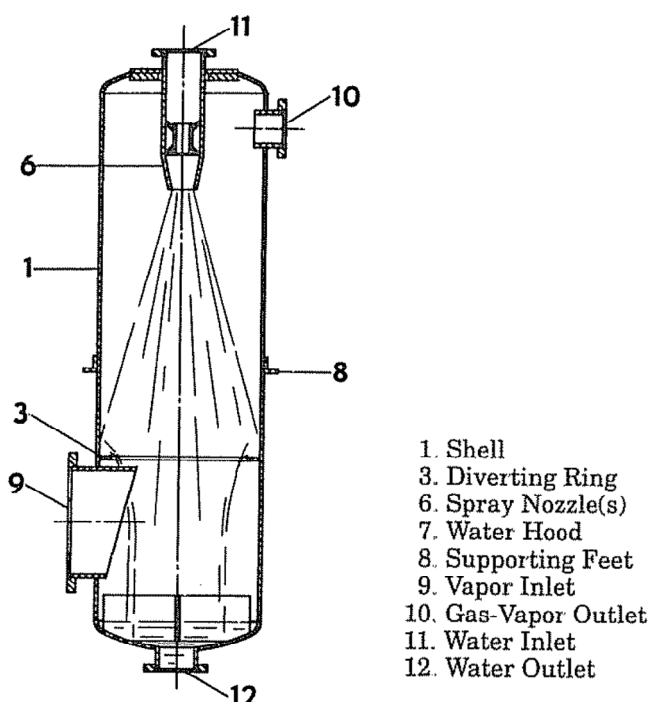


Figura 55. Condensador a contracorriente de tipo Spray [5]

Se le llama a contracorriente ya que el fluido de refrigerante va en dirección opuesta a la entrada del vapor. Este tipo de condensador de contacto directo consta una vasija de sprays, una entrada de vapor, una salida de condensado y una salida de gases incondensables.

El funcionamiento consiste en condensar un flujo de vapor saturado procedente de la turbina, debido a esa condensación se produce un vacío, por el cual se produce una absorción de más vapor. El flujo de vapor se introduce en dirección contraria al fluido refrigerante para reducir la velocidad del fluido refrigerante (en gotas) y así aumentar el tiempo de residencia.

La vasija para aplicaciones de centrales geotérmicas es de acero inoxidable AISI 316L, en la cual se tiene un orificio en la parte inferior destinada el escape del condensado por efecto la gravedad, es decir, el vapor se condensa y cae en forma de gotas. La altura de diversos factores, mientras que el diámetro depende de la cantidad de rociadores necesarios.

Se consta de una entrada de vapor, lo más inferior posible. Además la entrada de vapor favorece una mayor turbulencia, lo que a su vez aumenta el coeficiente de transferencia en el interior de la vasija.

Se dispone de dos salida, una por la cual salen los incondensables y otra por la que sale el condensado. La primera se ubica en la parte de arriba del condensador que está destinada a que salgan los gases incondensables.

Por último como elemento indispensable están los rociadores de que consiguen saturar el vapor que ayudado el fluido líquido atomizado procedentes de sprays rociadores. Estos rociadores en función del caudal que expulsan y el ángulo de aspersión determinarán el diámetro del condensador (dependiendo de la cantidad de rociadores y del diámetro de los mismo, determinará el diámetro de la vasija). En función del diámetro de la gota (se aproxima el volumen a una esfera) , de las condiciones de vacío. Suelen ser del tipo espiral de tal forma que no se acumule suciedad en el rociador y que se aumente el área a esparcir el fluido refrigerante. A la hora de escoger el rociador se busca que pueda expulsar gran caudal, el líquido de rocíe en gotas lo más pequeñas posibles y tener en cuenta el área que ocupa cada rociador. Algunas veces debido a que se necesita gran caudal se utilizan de cono axial, reducen mucho el área de aspersión y además aumentan el tamaño de la gota, utilizandose en casos excepcionales.

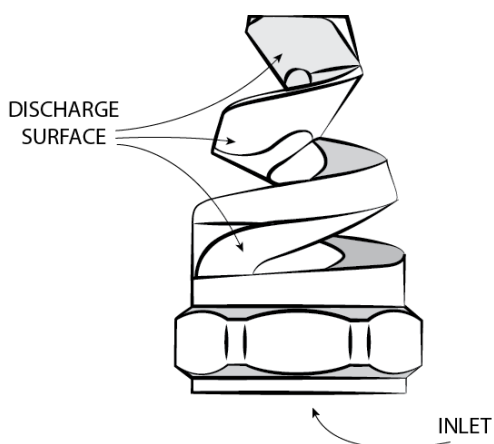


Figura 56. Spray de tipo espiral anti-obstrucción [9]

9.3.2.2 CONDENSADOR DE CORRIENTE PARALELA DE TIPO SPRAY

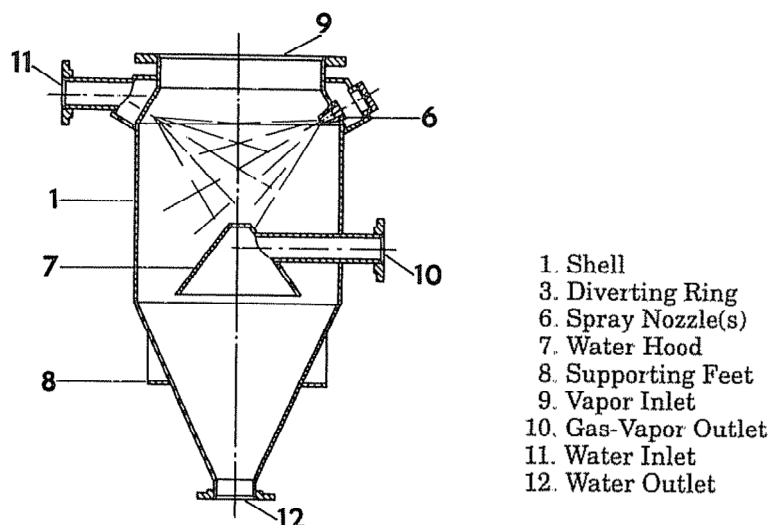
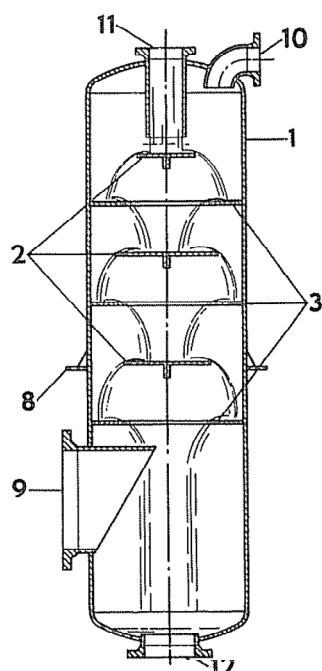


Figura 57. Condensador de corriente paralela de tipo Spray [5]

A diferencia del condensador contracorriente el flujo de vapor se introduce en dirección paralela a las gotas del fluido refrigerante. Sigue el mismo principio que el condensador contracorriente con la salvedad de que el vapor se introduce de manera paralela, se aumenta el tiempo de además de restringir de disminuir el volumen para la condensación.

Consta de los mismo elementos que el condensador explicado anteriormente con la salvedad de que el gas al introducirse en el interior del condensador se hacen en forma de tolva, lo que reduce de una manera más gradual la velocidad.

9.3.2.3 CONDENSADOR DE DISCOS O BANDEJAS A CONTRACORRIENTE



- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1. Shell | 8. Supporting Feet |
| 2. Diverting Disc | 9. Vapor Inlet |
| 3. Diverting Ring | 10. Gas-Vapor Outlet |
| 4. Distribution Weir | 11. Water Inlet |
| 5. Distribution Tray | 12. Water Outlet |

Figura 58. Condensador de bandejas a contracorriente [5]

El condensador de discos a contracorriente se basa en aumentar el tiempo de que haya transferencia de calor, eso lo conseguimos introduciendo un chorro de refrigerante en la zona superior que vaya cayendo en cascada en los sucesivos discos del condensador. EL área de transferencia es menor que los coitados anteriormente y además es propenso a obstrucciones. Pero compensa el hecho de que aumenta el tiempo en que existe transferencia de calor.

Como los anteriormente condensadores de contacto directo tiene una entrada vapor abajo del condensador para ser a contracorriente del refrigerante, lo que ayuda a envolver al vapor, una salida de incondensables en la zona superior y el condensado que cae por el orificio inferior de la vasija del condensador.

Existen numerosos tipos de condensadores de contacto directo, pero estos son de los más destacados en geotermia.

9.3.3 MATERIALES DE FABRICACIÓN DE LOS CONDENSADORES DE CONTACTO DIRECTO

Los condensadores de contacto directo se fabrican, en aplicaciones en las que se utiliza como fluido de trabajo el geotérmico de acero inoxidable, concretamente de la serie 316L.

El acero inoxidable es el más resistente a la corrosión que el acero. Es una aleación de cromo y acero y se emplea en forma de tubos, platos, cámaras y extensiones. Para trabajos de vacío no es recomendable el acero inoxidable de la serie 303 ya que contiene azufre. Por otra parte, la serie 316L es muy utilizada en sistemas de ultra alto vacío; su conductividad térmica y eléctrica es baja, no es magnético, y las temperaturas a que se exponen los sistemas de este tipo no deben de exceder los 1 000°C, porque el cromo se comienza a evaporar a los 1 200°C.

9.4 CONDENSADOR SELECCIONADO

Los condensadores de contacto directo se caracterizan por su bajo coste de mantenimiento (fácil detección de obstrucciones y reparación), su fácil instalación y que gracias a sus condiciones de vacío puede llegar prescindir de una bomba para la inyección del fluido (aunque se suele colocar de manera auxiliar). Además de ocupar menos espacio que un condensador superficial.

Entonces una central de este estilo utilizará un condensador de contacto directo de tipo barométrico de tipo spray a contracorriente. Ya que son fáciles de instalar y mantener, tienen altos coeficientes de transferencia, ocupan menos espacio que un condensador superficial y aumentan el rendimiento de la central geotérmica gracias a su nivel de vacío. Además de el fenómeno de introducir el vapor a contracorriente aumenta a envolver el vapor por el líquido atomizado.

9.4.1 SISTEMAS DE SEGURIDAD

Los equipos que funcionan a presión pueden diseñarse sobredimensionándose para soportar aumentos de presión o disminuciones drásticas de presión, esta opción en situación de un funcionamiento erróneo, supone un coste económico inadmisibles. Por otro lado pueden diseñarse para soportar una presión de diseño e incorporando dispositivos de seguridad o de alivio que protejan el equipo.

9.4.2 VÁLVULAS DE VACÍO

Se utilizan para operaciones de mantenimiento de la turbina, en las que es necesario mantener el flujo de vapor procedente del yacimiento, para no desequilibrar el sistema. Para esto es necesario que la presión de la turbina aguas abajo sea igual que aguas arriba. Al ser bypassado todo el vapor del yacimiento geotérmico al condensador, la presión aguas arriba es la atmosférica, por tanto, abre el condensador al exterior para poder igualar presiones, deteniendo así la turbina.

9.4.5 DISCOS DE RUPTURA

Aunque como dispositivos de seguridad, las válvulas rompedoras son las más utilizadas, en ciertas situaciones es necesaria la utilización de estos sistemas, para ofrecer una protección más fiable.

Se trata de unos dispositivos de alivio de presión de una sola utilización, accionados por diferencia de presión entre el interior y exterior y diseñados para funcionar por estallido o venteo de un disco.

Pueden llegar a aislar el fluido del lado externo de descarga, pero tienen el problema de que son de único uso.

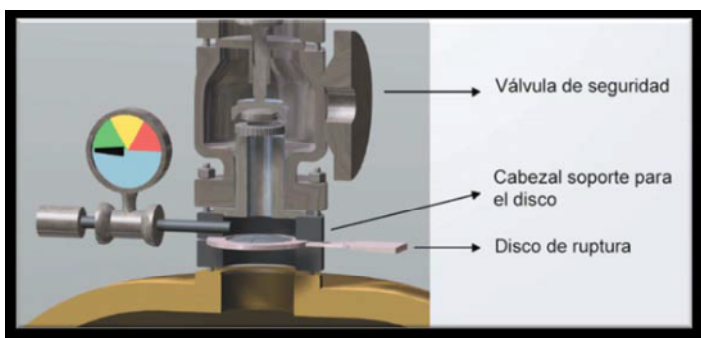


Figura 59. Esquema de disco de ruptura

10. SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE INCONDENSABLES

En los condensadores de vapor de las centrales geotérmicas, uno de los factores a tener en cuenta es que no se provoquen sobrepresiones en la vasija del condensador. Ya que provoca problemas de funcionamiento, Además en caso de sobrepresión muy alta provocaría explosión. Para mantener las condiciones de baja presión en un condensador hay que estar constantemente extrayendo los gases incondensables que contiene el fluido geotérmico. Estos dos parámetros son los principales objetivos de los extractores de gases incondensables en los condensadores.

Se distinguen principalmente en dos tipos los extractores en mecánicos y estáticos. Como se puede dilucidar los mecánicos son aquellos que emplean elementos rotativos o de desplazamiento lineal para absorber los incondensables del interior de la vasija del condensador. Mientras que los extractores estáticos en función de la disposición de secciones constantes y variables consiguen absorber los incondensables del interior de la vasija.

Si los condensadores trabajan en condiciones de presión por debajo de la atmosférica además se los llama bombas de vacío. Como el condensador de las centrales geotérmicas para aumentar su eficiencia se trabaja a presiones menores de la atmosférica entonces se seleccionará la bomba de vacío que mas interese para el propósito de extraer los gases incondensables.

Entre las bombas de vacío Mecánicas podemos la más utilizadas son las siguientes:

10.1 BOMBA DE VACÍO DE PALETAS

Esta bomba se caracteriza por constar de un rotor colocado de manera excéntrica. Además este rotor consta de una ranuras en donde se posicionan unas paletas que se pueden desplazar libremente de manera lineal.

Entonces el principio de funcionamiento sigue los pasos que se mencionan. El rotor de la bomba empieza a girar por el accionamiento del motor, por el efecto de la fuerza centrífuga las paletas que se encuentra en el interior del rotor de la bomba se desplazan hasta tocar la carcasa de la bomba. Como el rotor está colocado de manera excéntrica y las paletas se mueven hasta llegar a la carcasa, se crean múltiples cámaras en las que se encierra el flujo de incondensables y en el cual se reduce su volumen hasta expulsar en la tubería de descarga.

Se caracterizan por su bajo nivel sonoro, ausencia de contaminación , por su construcción robusta y mantenimiento reducido.

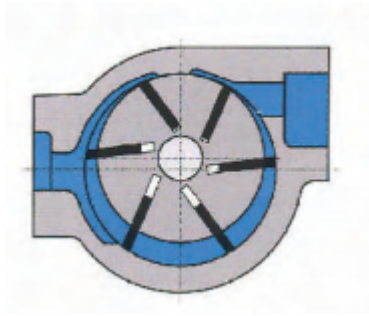


Figura 60. HPE Pressure&Vacuum technology Bomba de paletas [35]

10.2 BOMBA DE VACÍO DE DIAFRAGMA

La bomba de membrana es un tipo de bomba de desplazamiento lineal, generalmente alternativo, en el que el aumento de presión se realiza por el empuje de unas paredes elásticas (diafragma) que varían el volumen de la cámara, aumentándolo y disminuyéndolo alternativamente. Unas válvula de retención, normalmente de bolas de elastómero, controlan que el movimiento del fluido se realice de la zona de menor presión a la de mayor presión.

El accionamiento de este tipo de bombas eléctrico (es decir, mediante una electrobomba) pero la mayoría son de accionamiento neumático (o sea, por aire comprimido).

Este línea de bombas suelen trabajar a doble diafragma, siguen el mismo principio de funcionamiento que el mencionado, pero tienen dos cámaras con un diafragma cada una, de forma que cuando una membrana disminuye el volumen de su cámara, la otra cámara aumenta su volumen y así de manera cíclica.

Caracterizan por una alta eficiencia, bajo nivel sonoro, buen hermetismo y adaptan bien a diferentes gases.

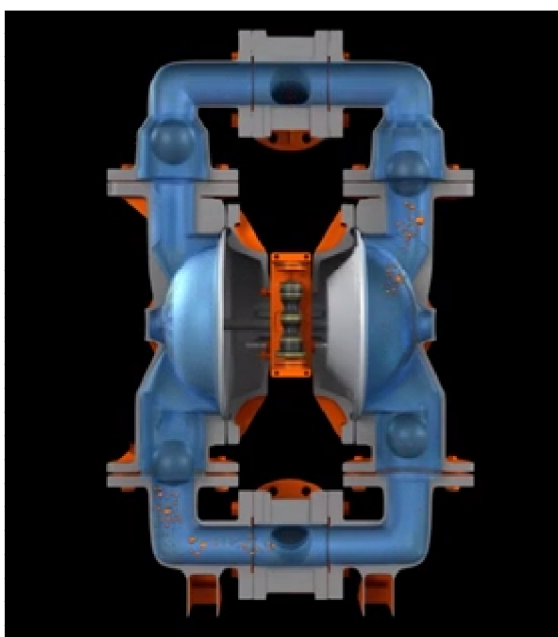


Figura 61. HPE Wilden. Bomba de diafragma [35]

10.3 BOMBA DE VACÍO DE LÓBULOS

Las bombas de lóbulos están constituidas esencialmente por dos rotores o engranajes exteriores, de forma lobular encerrados en una carcasa. El movimiento relativo de estos rotores, es el de un par de engranajes que giran a la misma velocidad angular, aunque esta propiedad sea impuesta por un mecanismo exterior al cuerpo de la bomba. De la precisión con que se efectúa este movimiento se consigue que los rotores no se rocen entre sí, ni con la carcasa, lo cual permite que las bombas puedan girar en ambos sentidos, sin rozamiento del metal. Se caracteriza por excelentes alturas de aspiración (aunque también depende del fluido a bombear y velocidad de accionamiento).

Trabajan generalmente a baja velocidad de rotación, asegurando así un tratamiento delicado del producto a bombear, siendo posible conducir fluidos muy viscosos. Su principio de funcionamiento consiste en aprisionar el fluido en el espacio comprendido entre dos dientes consecutivos y transportando así de la aspiración a la impulsión. Suele tener un mantenimiento más costoso

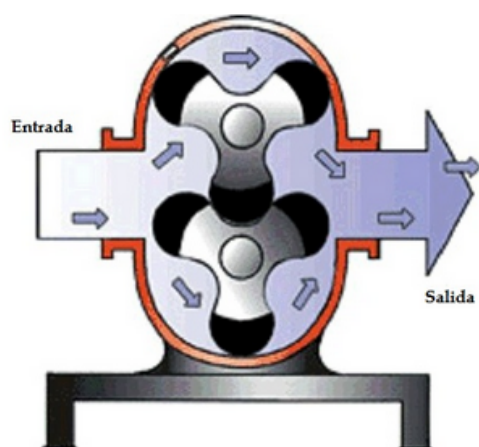


Figura 62. Bomba de lóbulos

10.4 BOMBAS DE ANILLO LÍQUIDO

Existen diversas formas constructivas de las bombas de anillo líquido dependiendo de la forma en la que se produce la aspiración y la salida de aire o la entrada y el drenaje del agua de formación del anillo pero la estructura de la bomba y filosofía de funcionamiento es la misma.

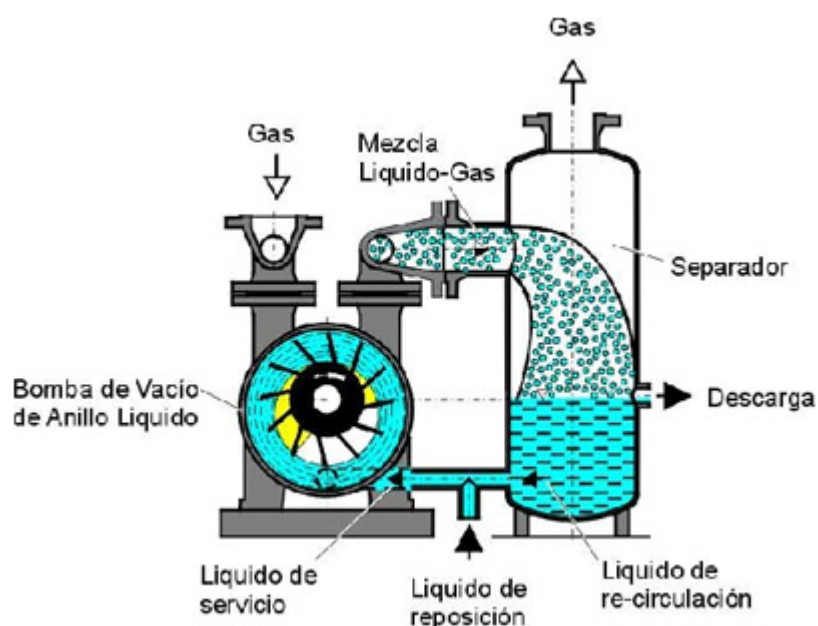


Figura 63. Bomba de anillo líquido (NASH) [32]

Como se puede apreciar en el esquema se posee una entrada por la cual el gas se aspira y otra entrada por la que el líquido de la bomba introduce. Se puede observar que el impulsor está situado de manera excéntrica dentro de la carcasa y además la carcasa está inundada por un líquido. El principio de funcionamiento consiste en introducir un líquido, que al comenzar a girar el impulsor, forme un anillo

líquido alrededor de la carcasa. El impulsor al estar colocado de manera excéntrica y tener paletas genera celdas entre líquido y las paletas cada vez más pequeñas.

Entonces el gas a aspirar se introduce por una tubería a la bomba en funcionamiento. El gas es aspirado ya que por el movimiento del rotor la presión es más baja en el interior de las celdas. Según el gas es conducido alrededor de la carcasa las celdas cada vez son más pequeñas y por tanto el gas se comprime. Este gas se expulsa por la tubería de descarga. El gas al expulsarse tiene una cierta cantidad de líquido, ya que ha estado presionado en el interior de la bomba por el líquido y las paletas del impulsor. El líquido debido a la compresión y el movimiento de la bomba ha aumentado su temperatura. Esta mezcla de gas con gotas se lleva a un separador, y debido a que el líquido es más denso que el gas, este es al techo y el líquido cae al fondo del separador. Este líquido se utiliza para reinyectar a la bomba de anillo líquido, para tener las menores pérdidas posibles. Aún así es necesario inyectarle líquido.

La principal ventaja de estas bombas estriba en que al no existir roce entre el rotor y el estator, debido a que es el anillo de líquido el que roza con ambos, no hay prácticamente desgaste entre las piezas. El mismo anillo hace de lubricante y refrigerante.

La elección de los materiales de la bomba depende del tipo de gas y refrigerante que se va a utilizar. Pero normalmente se construyen de bronce, acero inoxidable (ANSI 316L, especialmente) o acero de fundición.

10.5 EYECTORES DE VAPOR

Hasta entonces se ha destacado los tipos de extractores de gas rotativos. Los cuales pueden llegar a ser muy eficientes y tener poco mantenimiento. Pero ninguna de estas bombas de vacío tiene tan bajo mantenimiento como los eyectores de vapor. El cual extrae los incondensables fundamentalmente con un diseño de un dispositivo de diversas secciones en las que se aplica el efecto Venturi.

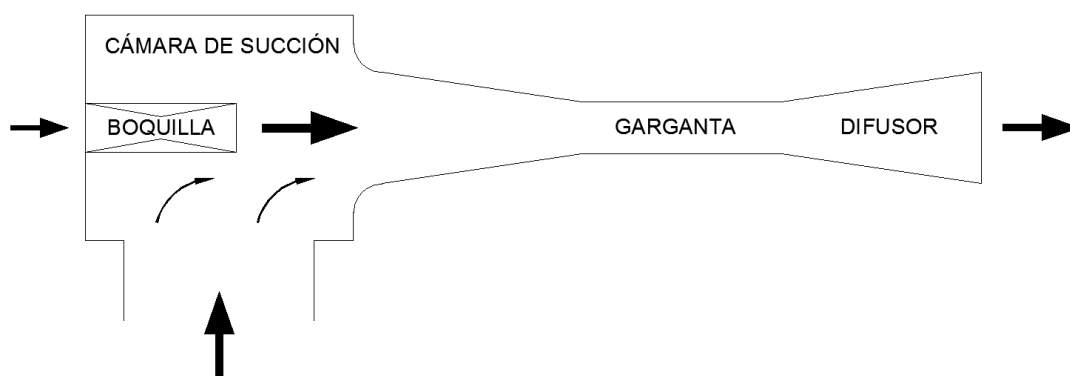


Figura 64. Identificación de los elementos de un eyector a presión.

Un eyector de vapor consta de las siguientes partes una boquilla, una cámara de succión, la garganta y el difusor. La boquilla es donde se introduce un gas a alta presión, la cámara de succión donde se mezcla el gas a alta presión y el gas que se requiere succionar, la garganta es la zona de sección constante donde pasan los gases mezclados y el difusor la zona de sección variable donde pasan por último los gases antes de expulsarse.

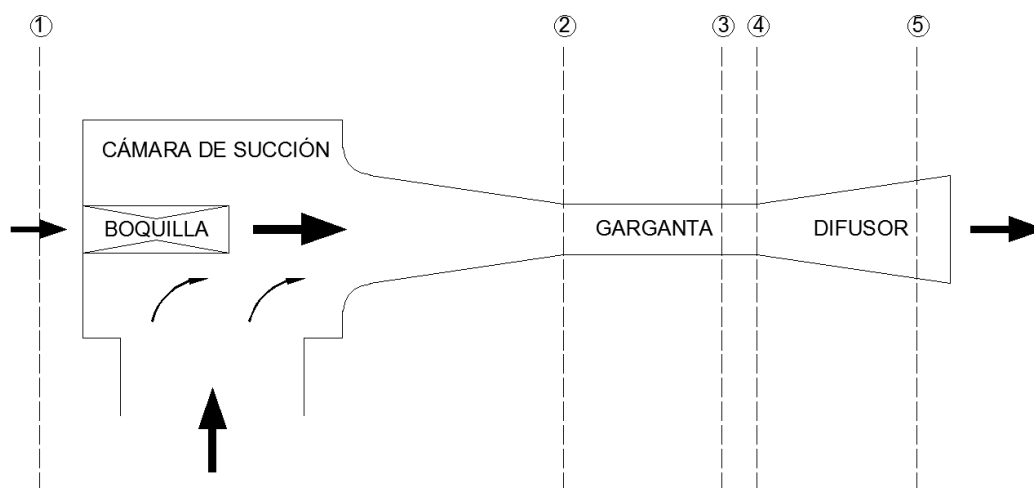


Figura 65. Representación de los lugares donde se producen cambios en un eyector

Para una mejor comprensión del funcionamiento del eyector nos apoyaremos en la anterior figura.

- a) En el punto 1 podemos distinguir que a través de la boquilla es donde se mete un gas a alta presión a una velocidad subsónica. La corriente de gas al pasar en principio por una sección convergente empieza a incrementar su velocidad a demás de disminuir sus presión. La siguiente sección de la boquilla es constante y es donde normalmente el fluido alcanza la velocidad del sonido. Por último en la boquilla se pasa por una sección divergente donde el fluido disminuye la onda de choque que se produce (en caso de superar la velocidad del sonido). Este flujo de gas se le llama fluido motor.
- b) En la cámara de succión se introduce el gas que se pretende extraer del condensador. Debido a que el gas que sale de la boquilla se está introduciendo a gran velocidad y una presión más baja que a la entrada de la boquilla induce a arrastrar al fluido que viene del condensador.
- c) El fluido motor y el arrastrado en la cámara de succión a continuación pasan por la zona convergente donde debido a su sección cada vez más pequeña se disminuye la presión y aumenta la velocidad.
- d) A partir del punto 2 la sección es constante y es donde se mezclan la corriente de flujo motor y el arrastrado. Debido a que al entran en la garganta se llega a la velocidad del sonido se produce una onda de choque que genera que disminuya de manera abrupta la velocidad del flujo mixto y además aumente la presión (punto 3).

- e) El flujo mixto transcurre a continuación por la sección divergente. Donde la velocidad disminuye y por tanto la presión aumenta. Es decir la energía cinética se transforma para aumentar la presión (punto 5).

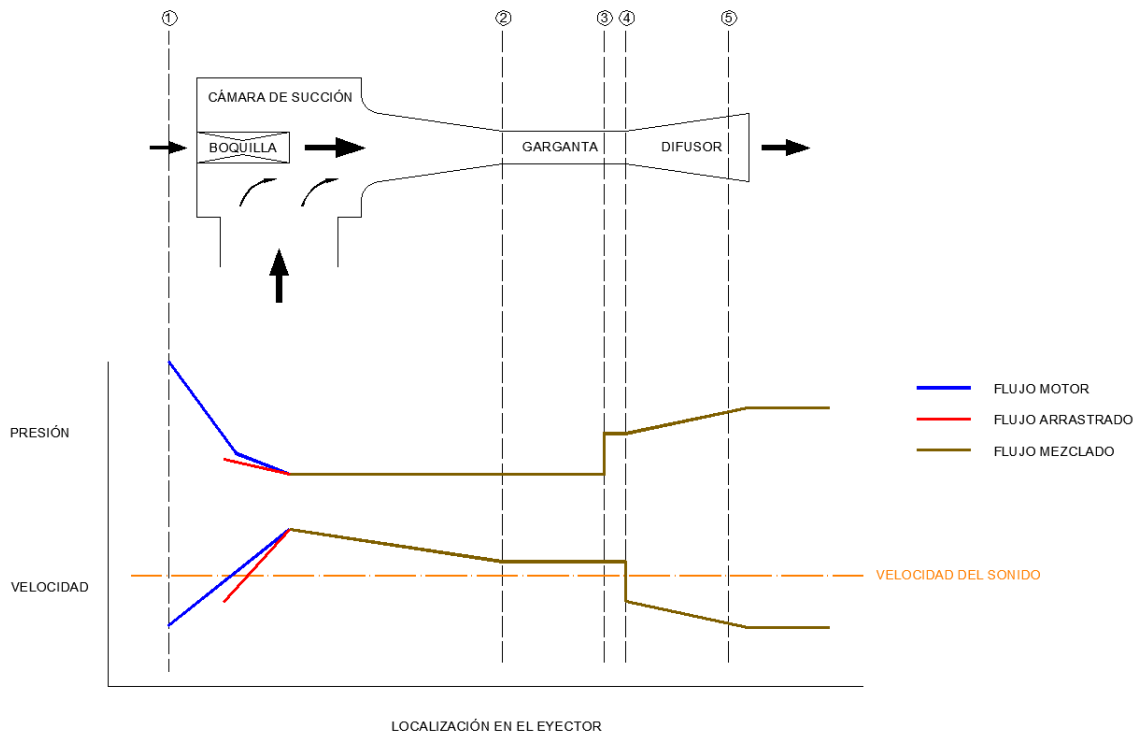


Figura 66. Representación de la velocidad y la presión de los fluidos a través del eyector

Este tipo de termocompresores se suelen construir de diferentes materiales dependiendo del tipo de fluido con los que vayan a trabajar. suelen ser de acero al carbono, titanio, cobre o acero inoxidable. Sobre todo para que comenta oxidación se utilizan aceros inoxidables.

Las principales ventajas de estos elementos es no requieren excesivo mantenimiento, ya que al no contener elementos mecánicos no se producen excesivos desgastes y rotura por golpes. El coste de un eyector de vapor suele ser más barato ya que su diseño es más simple que las bombas de vacío. Además son más fáciles de instalar. Pero la principal desventaja es que tiene una eficiencia más baja que las bombas de vacío.

Se han destacado la principales bombas de vacío existentes hoy en día. Pero lo más utilizado para la centrales geotérmicas son las Bomba de anillo líquido y los eyectores de vapor. Lo bueno de las bombas de anillo líquido es su alta eficiencia, además de su bajo mantenimiento debido a la existencia del anillo líquido. Los eyectores vapor son una tecnología eficiente de bajo coste y muy duradera, ya que carece de elementos en rotación, además de no consumir energía eléctrica. Existen diferentes configuraciones para obtener vacío lo más rápido y eficiente posible.

10.6 EXTRACCIÓN MULTITAPADA DE EYECTORES DE VAPOR

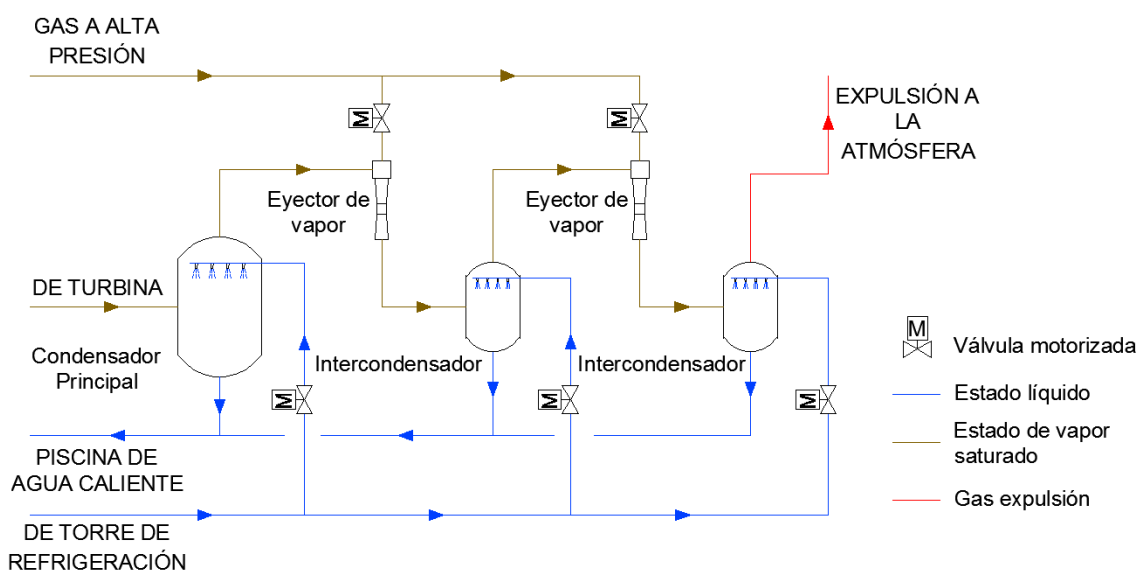


Figura 67. Esquema de un sistema de extracción multitapa de eyectores de vapor

Los sistemas multitapa de eyectores de vapor son uno de los métodos más comunes de extracción de incondensables en las centrales geotérmicas. En este esquema se representa una extracción de incondensables en 2 etapas. La cantidad de eyectores dependerá del nivel de vacío que se quiera obtener en el condensador principal. El proceso a seguir de esta configuración es la siguiente:

Mediante un vacuómetro y un termómetro se controla la medida de vacío del y temperatura del condensador principal y de los intercondensadores. En función de esas medidas se controlan las válvulas motorizadas para dejar que entre mayor o menor caudal de gas a alta presión para mantener el vacío del condensador. Además en función de la medida de vacío y temperatura se actúa en las válvulas motorizadas de las tuberías de agua para impulsar más o menos caudal por los rociadores.

Es necesario las válvulas motorizadas para adaptarse en función de la demanda y porque siempre hay pérdidas en el circuito que hacen disminuir la producción de electricidad. Además de fluctuaciones de producción.

Se colocan intercondensadores por varias razones: para condensar el poco vapor de agua que residual mezclado con los incondensables, además de tener un apoyo auxiliar del condensador principal en caso de fallo o de bajo rendimiento.

En resumen, el gas saturado de la turbina pasa por el condensador principal en donde se extrae el agua y la primera etapa de eyectores absorbe los incondensables. Como los incondensables tienen vapor de agua se pasa por el primer intercondensador. Para eliminar el máximo posible de vapor de agua se pasa por otra etapa de eyector más condensador. En esta etapa se expulsa los incondensables (aire

principalmente) a la atmósfera a una presión parecida o superior a la atmosférica. Si se intentase expulsar a una presión menor que la citada habría problemas de funcionamiento.

El principal problema de esta configuración es que no tiene una respuesta inmediata además que no es buena idea confiar todo el trabajo a los eyectores de vapor ya que su eficiencia no es la más alta y además su respuesta no es inmediata.

10.7 EXTRACCIÓN MULTITAPA DE BOMBAS DE VACÍO DE ANILLO LÍQUIDO

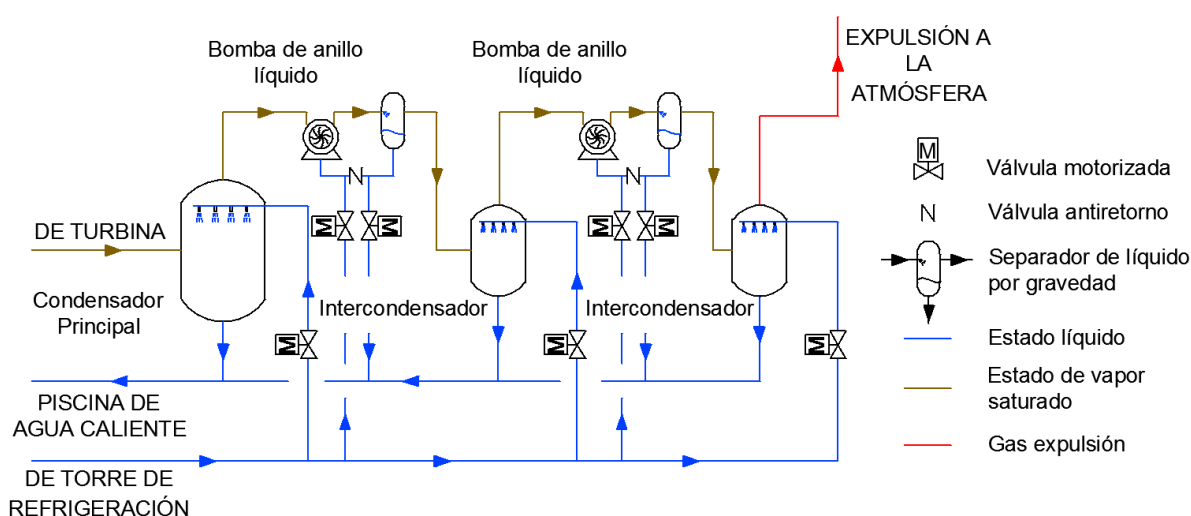


Figura 68. Representación un sistema de extracción multitapas de bombas de vacío de anillo líquido.

El sistema de extracción por bombas de vacío de anillo líquido ha sido empleada en centrales geotérmicas. Su ventaja respecto los eyectores es su rápida respuesta. Pero la desventaja es la necesidad de una instalación más compleja.

Al igual que la instalación citada por eyectores los condensadores constan de un vacuómetro y un termómetro para medir las condiciones de vacío y temperatura y así controlar las válvulas motorizadas. las primeras válvulas controlan el caudal de agua a introducir en los condensadores , las segundas controlan la reposición de líquido en la bomba y las terceras el vaciado del decantador de agua de la bomba (separador de líquido por gravedad).

El proceso a seguir es el siguiente se introduce el vapor saturado a condensar al condensador principal. El condensador se envía a la piscina y los incondensables a la bomba de vacío. La bomba de vacío comprime los gases incondensables, con lo que se consiguen extraer del condensador principal. La bomba al comprimir los incondensables con restos de vapor saturado lo mezcla con el líquido de la bomba. En el decantador se eliminan las gotas que viajen en el interior de flujo de los incondensables, el agua se enviará a la piscina y los incondensables al

intercondensador. En la siguiente etapa el proceso es el mismo sólo que esta vez el intercondensador expulsa los incondensables a la atmósfera.

La bomba de anillo líquido contará de una válvula de retención entre la reposición de líquido de la bomba y la expulsión de líquido sobrante de la bomba. Así se puede pasar el líquido del decantador a la bomba, pero no el líquido de reposición al decantador. Se debe reponer el líquido de la bomba debido a pérdidas, como decantar en caso de líquido sobrante, debido a que los incondensables arrastra una cierta cantidad de vapor de agua. Además esta configuración permitir hacer un baypass con el agua sin que pase por la bomba en caso de mantenimiento, como mantener en un ciclo cerrado el líquido de la bomba al decantador y del decantador a la bomba.

Esta configuración es eficiente y tiene una respuesta rápida en el sistema. Pero en las centrales geotérmicas tampoco es necesario una respuesta tan rápida además de las bombas de anillo líquido agotan parte de la energía producida en la central en hacer mover el rotor de la bomba.

10.8 EXTRACCIÓN MULTITAPPA HÍBRIDA

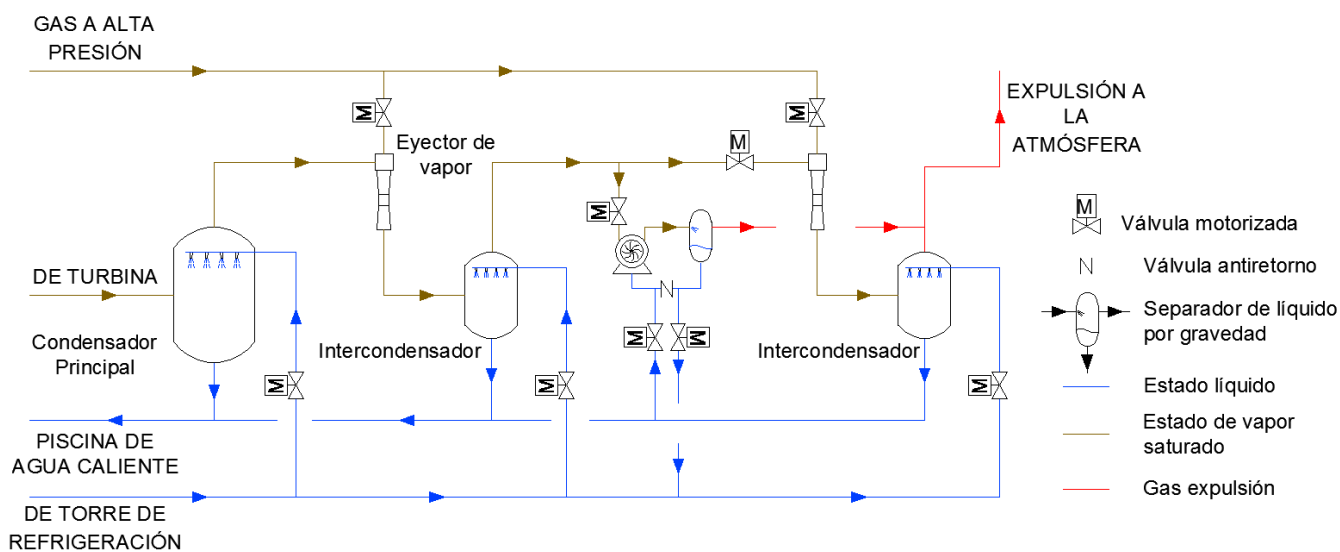


Figura 69. Sistema de extracción híbrida.

El sistema de extracción multitapa híbrida mezcla las dos ventajas de la extracción con eyectores de vapor y las bombas de anillo líquido. ya que mezcla la sencillez y robustez de un sistema de eyectores de vapor, con la fiabilidad y velocidad de respuesta de las bombas de vacío de anillo líquido.

Esta configuración consta al igual que la los demás planteamientos de válvulas motorizadas. En función de un vacuometro y un termómetro se podrá controlar las válvulas motorizadas para regular el vacío que hay en los condensadores. Sin embargo en la segunda etapa se puede distinguir que existen dos caminos a seguir. Uno sería con un eyector de vacío y el otro con una bomba de vacío de anillo líquido. En funcionamiento normal la válvula motorizada está cerrada y no pasa caudal de



incondensables a través de la bomba. Es decir, en funcionamiento normal sería un sistema multietapa de eyectores de vapor. En el segundo caso, se cierran la válvula de la segunda etapa del eyector y entra en funcionamiento la bomba de vacío.

Esta doble configuración es útil por varias razones. En modo de funcionamiento normal no consumen los eyectores de vapor, además su configuración es sencilla y fácil de controlar. En caso de que las condiciones de vacío se alteren entra en funcionamiento de la bomba de anillo líquido o en arranques del sistema de extracción.

Es importante mencionar que en estado de funcionamiento con la bomba en las tuberías se consta de una válvula reductora de presión, para no sobrepresionar la tubería y así no explote.

Dado a las ventajas que ofrece esta configuración será la elegida para el diseño de la central.



11. SELECCIÓN FINAL Y PARÁMETROS DE DISEÑO

11.1 SITUACIÓN DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO

La central seleccionada se caracteriza por unas propiedades que las distingue de a las demás centrales geotérmicas.

Es una central creada por hidrofracturación en yacimientos de roca caliente. El método emplear es la perforar el yacimiento elegido (en Andalucía) el cual tiene un potencial geotérmico pero carece de fluido propio con el que trabajar. Como el yacimiento después del reconocimiento del suelo puede tener fracturas pero no lo suficientemente grandes para que hasta una transferencia de calor satisfactoria por seguridad se perforará hasta una profundidad de un 2, 6 km y se estimulará mediante pulsos de agua a alta presión el yacimiento. Así aumentarán el número de fracturas y las interconexiones entre las mismas.

La ventaja de esto es que como en España hay diferentes yacimientos geotérmicos de roca caliente pero sin fluido propio podrían aumentarse el número de centrales geotérmicas. Ya que teniendo un yacimiento, se puede introducir e utilizar un fluido para adaptar un yacimiento y a continuación instalar un central en la que el fluido esta seleccionado y se impulsa e utiliza para generar energía eléctrica.

El yacimiento utilizado se encuentra en Roqueta del mar (Andalucía, España) a 2,5 km de profundidad. sus potencia térmica es de entre unos 80-100 MW y de roca caliente fracturada.

El fluido de trabajo está en condiciones de saturación con un título de vapor a la salida del yacimiento de 0,3.

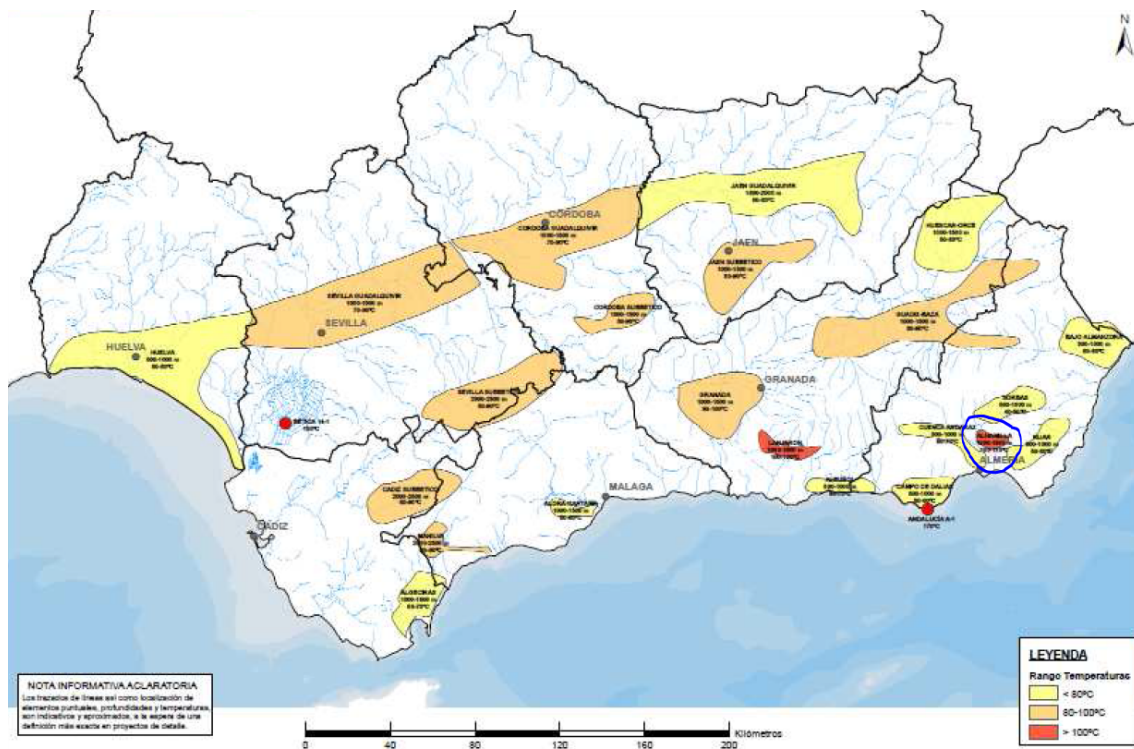


Figura 70. Mapa de situación geográfica y temperatura de Roquetas del Mar, Andalucía [23]

11.2 FLUIDO DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO

El fluido del yacimiento geotérmico es agua. Al ser una zona cerca del mar es tratada el agua y utilizada en la central.

La composición es la normal para el agua de las centrales geotérmicas.

FÓRMULA	PORCENTAJE (%)	PESO MOLECULAR	INCONDENSABLES (%)	CONDENSABLES (%)
CO_2	95.94	44	2 % del flujo másico total	--
H_2S	2	34.08		
HCl	0.09	36.46		
N_2	1.91	28.01		
H_2O	--	18	--	98 % del flujo másico total

Tabla 2. Composición del fluido de trabajo [9]

El peso molecular promedio de los incondensables por tanto es de 43.46 y del vapor de agua 18. Los incondensables se consideran principalmente aire en los estudios de yectores.

11.3 FUNCIONAMIENTO DE LA CENTRAL SELECCIONADA

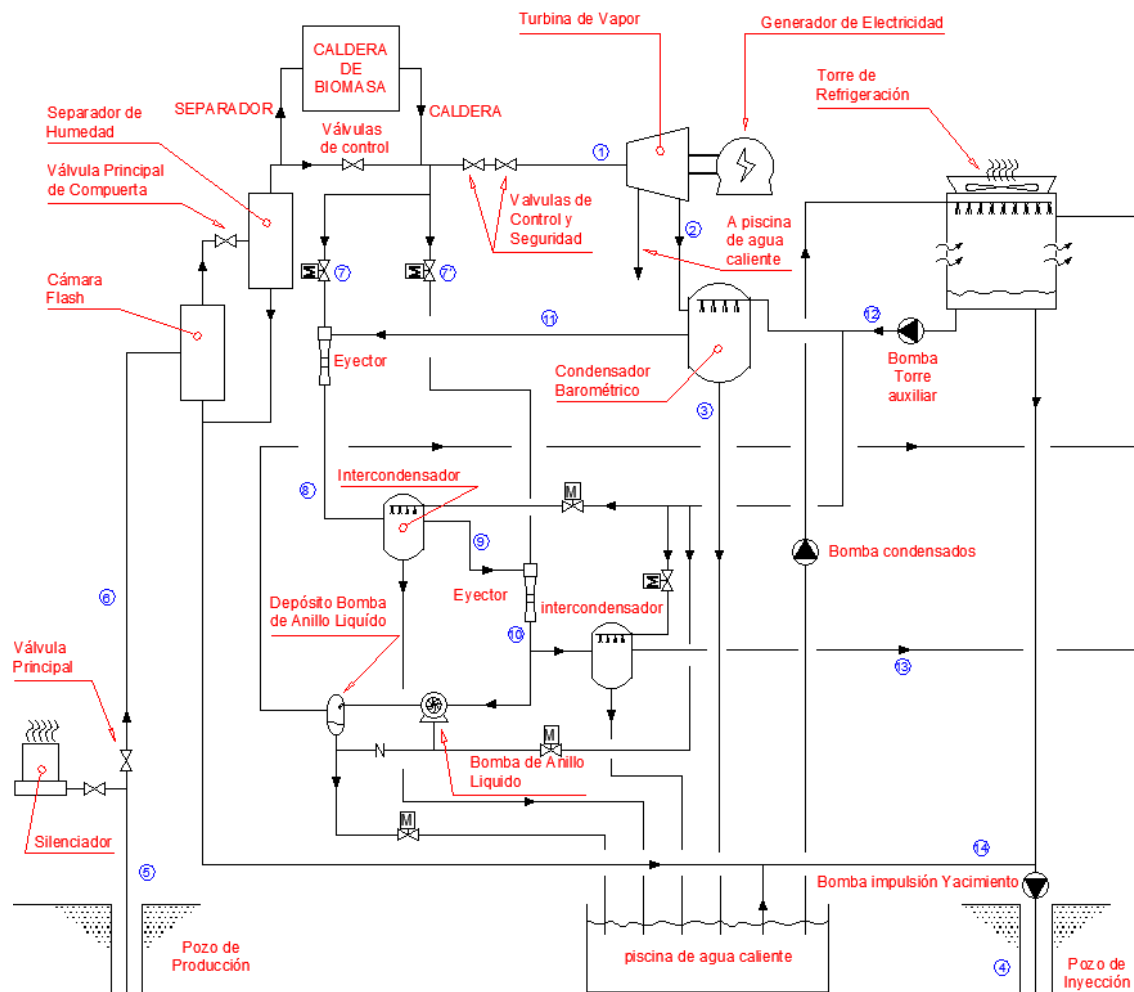


Figura 71. Esquema de la instalación final de una central geotérmica flash con apoyo de una caldera de biomasa.

La central geotérmica seleccionada es de simple flash, sabiendo el título de vapor del agua al salir del yacimiento (0.3) , para un mayor aprovechamiento de la energía obtenida.

Al salir el flujo bifásico (punto 6) se lleva a la cámara flash. En la cámara de flas tras separarse el vapor del líquido, el vapor se lleva al separador de humedad y el condensado a la piscina de agua caliente. A continuación el vapor es pasado por un separador de humedad, el cual se separan las gotas y se consigue un vapor de agua con un título de vapor de 1. La pérdida de estos dos componentes supone de 0.1 bar.

El gas procedente del separador de humedad en caso de tener la temperatura óptima de funcionamiento (180 °C) no por la caldera. En caso de que el vapor haya bajado a una temperatura de 120 °C la caldera de biomasa se aprovecha para obtener una potencia térmica regular sin altibajos de producción.

El gas es bifurcado a la alimentación de los eyectores (7 y 7') de vapor en primera estancia y la otra bifurcación se conduce a la turbina de condensación (1).



En la turbina se expansiona el vapor y el condensado se conduce a la piscina de agua caliente. El vapor que sale de la turbina (2) tiene un título de 0.8.

En el condensador barométrico, el vapor es condensado y va a través de la pierna barométrica (3) a la piscina de agua caliente. Los incondensables que se encuentran en este condensador principal son absorbidos por el primer eyector de vapor (11). El líquido refrigerante utilizado en el condensador es procedente de una torre de refrigeración de tiro natural (12). Saliendo de la torre de refrigeración se coloca una bomba pero debido a las condiciones de vacío en el condensador absorbe el líquido requerido para la condensación.

Los eyectores de vapor están alimentados de vapor a alta presión (7 y 7') para arrastran a los gases incondensables más una pequeña cantidad de vapor del condensador principal (11), del intercondensador 1 (8) y del intercondensador 2 (9). El condensado de los intercondensadores se envía a la piscina de agua caliente.

De la piscina de agua caliente se envía el fluido al yacimiento geotérmico (4).

11.4 RESUMEN DE ELEMENTOS PRINCIPALES SELECCIONADOS

11.4.1 SILENCIADOR

Se selecciona un silenciador sencillo y económico, compuesto de una placa doblada en V hecha de acero de alta resistencia, por donde pasa el fluido; la placa está instalada de manera tangencial a la estructura externa hecha en forma de torres cilíndricas gemelas. El fluido al girar alrededor de los cilindros va formando un remolino por el cual pierde energía cinética por la fricción de dicho fluido.

No se introduce en los cálculos ya que se utiliza la producción de vapor es muy grande en términos de cantidad de caudal sobre capacidad de producción de la planta es necesario este exceso desecharlo para no someter al sistema a sobrepresiones que puedan causar daño; el ruido que genera los vapores desechado puede ocasionar muchas molestias no solo para quienes trabajan cerca de la planta sino para la fauna y las personas residentes a la zona de desecho. Por lo que para el cálculo no es significativo.

11.4.2 SEPARADORES

El separador para distinguir el fluido del líquido del flujo geotérmico es un separador ciclónico. Las principales ventajas que distinguen los separadores ciclónicos que los del resto del mercado: Carecen de partes móviles, lo cual significa que se requieren menos mantenimiento; son poco versátiles, pero muy eficientes y ocupan menos espacio que un sedimentador.



Para eliminar las gotas del separador que salga de gas que salga del separador ciclónico se utiliza un separador de gotas. Aunque muchas veces se utilizan separadores horizontales en este caso se utiliza un separador de gotas el cual cuenta con una malla de tipo coalescente. Son paquetes de paletas o de otra estructura destinada a la agregación de la niebla en gotitas que cuando son lo suficientemente numerosas como para separar de la corriente de vapor.

11.4.3 CALDERA

La caldera seleccionada será una caldera de biomasa de lecho fluidizado. Se selecciona este tipo de caldera ya que su agresión al medioambiente. Mediante el control se aprovecha el calor generado a una temperatura más baja que en una caldera convencional, pero sin pérdida de eficiencia. Con estas temperaturas se está por debajo de la formación de emisiones contaminantes con los óxidos de nitrógeno y también se evitan problemas de sintonización y formación de escorias asociados con las calderas convencionales. Además es la caldera que permite mejor control de la temperatura, lo cual nos interesa para mantener una producción regular en la central geotérmica.

Como elemento adicional la biomasa se mezcla con carbón nacional, el cual tiene un alto contenido en azufre. La mezcla con el carbón aumenta el poder calorífico, aunque no se haga una combustión tan limpia como si en el carbón.

Se selecciona una caldera de biomasa ya que es un combustible ecológico y consigue que la idea de una central geotérmica con ayuda de una caldera se considere un elemento muy atractivo.

Para los criterios de cálculo solo se halla la potencia necesaria para alcanzar la temperatura deseada. Para mayor detalle revisar el anexo de cálculos 1.

11.4.4 TURBINA DE VAPOR

Se selecciona una turbina de condensación su principal ventaja respecto la de contrapresión es que al expansionarse el vapor que pasa por la turbina este puede alcanzar presiones de vacío. Es debido que al fluido al condensarse en el interior de la turbina crea una presión mucho más baja, lo cual obliga a turbinar más vapor dentro de la turbina debido a una mayor diferencia de presiones entre la entrada y la salida. En pocas palabras es la más eficiente del mercado.

Para el diseño de la central como base se sabe que el vapor al pasar por la turbina baja hasta una presión de 0.07 bar y además el título de vapor es de 0.8. El dato corriente de rendimiento isentrópico del 90 %, un rendimiento mecánico de 80 % y un rendimiento eléctrico del 75 %. Lo cual nos expresa la potencia más real para obtener una potencia de 25 MWe. Para mayor detalle revisar el anexo de cálculos 1.

11.4.5 CONDENSADOR. CONDICIONES DE CÁLCULO

Como principal objetivo se ha expuesto los elementos necesarios para trazar la instalación de una central geotérmica con apoyo de una caldera de biomasa. El siguiente objetivos es dimensionar y diseñar un condensador barométrico de contacto directo.

Se ha elegido un condensador barométrico de contacto directo por spray principalmente porque su bajo mantenimiento. La condensación por contacto directo, permite que dentro del condensador no existan elemento móviles ni tedioso recorridos de tuberías, lo cual facilita ver obstrucciones con mayor facilidad. Su mayor facilidad de crear en un su interior vacíos alto, aumenta mucho el rendimiento de la central. Por último aunque su pierna barométrica sea de unas dimensiones grandes (ya que es necesario para no aumente la presión dentro de la vasija) la dimensión del globales son más pequeñas que un condensador de superficie, lo cual permite que su precio se abarate muchísimo.

Para el diseño del condensador se han tomado las siguientes hipótesis basadas en las recomendaciones de las normas que se mencionan y teoría relativa de los libros con mayor peso sobre este tipo de sistemas de condensación.

Se considera estar trabajando con vapor saturado procedente de la turbina, con un título de vapor de 0.8 tras haber pasado por la turbina. Trabaja a una presión de 0.07 bar y utiliza rociadores para la condensación del vapor.

Para determinar la cantidad de refrigerante necesario se necesita para condensar el vapor, se utiliza la siguiente balance.

$$\dot{Q} = \dot{M}_L \cdot c_{pL} \cdot (T_{sat} - T_{entrada})$$

A partir de este balance, con la potencia del condensador calculada (anexo 1) se estima la cantidad de refrigerante alcanzar la fase de condensación. La diferencia de temperaturas de $(T_{saturación} - T_{entrada})$ es la máxima que se puede tener en condenador.

Como el rendimiento el rendimiento del condensador no es del 100% se estima que:

$$\dot{Q} = \dot{M}_L \cdot c_{pL} \cdot \theta \cdot (T_{sat} - T_{entrada})$$

θ se calcula en función de la correlación de Pasamehmetoglu:

$$\theta = \frac{T_{media} - T_{entrada}}{T_{sat} - T_{entrada}} = [1 - \exp(\pi^2 \cdot F_0)]^{1/2}$$

Despejando, para obtener la masa de líquido:

$$M_L = \frac{\dot{Q}}{cp_L \cdot \theta \cdot (T_{sat} - T_{entrada})}$$

Para el cálculo de la masa refrigerante se ha seguido el proceso de cálculo del libro "process heat Transfer".

Para poder determinar la altura necesaria poder hacer la transferencia de calor entre la gota y el vapor se ha seguido el proceso de cálculo de "process heat Transfer".

En función de la ecuación general del movimiento de una gota esférica, de volumen V y diámetro D, un movimiento relativo respecto la circulación del vapor. Siendo su velocidad V.

$$\underbrace{\rho_L \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \frac{dV}{dt}}_{\text{Fuerza para acelerar la gota}} = \underbrace{\frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot (\rho_L - \rho_G) \cdot g}_{\text{Fuerza debida a la gravedad}} - \underbrace{C_D \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\rho_G \cdot V^2}{2}}_{\text{Fuerza de arrastre}}$$

Ecuación 3. Fuerzas a las que está sometida una gota en un condensador de contacto directo tipo spray

[1]

- En la que se tiene en consideración que la gota se aproxima a una esfera en el vacío.
- La velocidad de la gota se considera mucho mayor que la de el vapor, por tanto la velocidad del vapor se considera despreciable.
- Se considera que la ecuación de la gota es una conducción transitoria, es decir, se considera que las resistencias térmicas interfaciales y las del lado del gas son insignificantes.
- Además si se considera la gota en una conducción transitoria puede calcular suponiendo que la temperatura superficial llega a ser igual a T_{sat} en el instante en el que entra en el recipiente y se pone en contacto con el vapor. Esta suposición es estrictamente cierta cuando el número de Jacob es muy grande, por ejemplo, mayor de 20 para la condensación de vapor en gotas de agua.
- El incremento del tamaño de la gota en la condensación se considera despreciable en los cálculos referentes a la transferencia de calor, de hecho se considera que el diámetro de la gota a la entrada en el condensador es constante e igual que el de entrada. Esta suposición es razonable para aplicaciones ya que el diámetro aumenta usualmente menos de un 3%.

Al desarrollar y despejar la fórmula antes mencionada se obtiene la velocidad a la que se reduce la gota por encontrarse en un condensador en contracorriente de contacto directo y con eso la distancia necesaria para la transferencia de calor, en otras palabras, la altura de la vasija del condensador. Para mayor detalle revisar el anexo de cálculos 2.

$$V_{final}^{-0.16} = V_{inicial}^{-0.16} \cdot 3.23 \cdot \frac{\Gamma \cdot t}{D^{1.84}} \rightarrow$$

$$Altura_{condensador} = 0.06 \cdot \frac{D^{1.84}}{\Gamma} \cdot (V_{inicial}^{0.84} - V_{final}^{0.84})$$

Ecuación 4. espacio necesario para transferencia de calor [1]

Para determinar la sección necesarias de la entrada vapor, salida de incondensables, pierna barométrica y entrada de refrigerante se han tenido en cuenta las recomendaciones de diseño del HEI (heat exchange institute).

El diámetro de la vasija del condensador está limitada por la cantidad de rociadores necesarios para introducir el líquido refrigerante, ya que a la continua extracción de los incondensables y del condensado en la pierna barométrica no inoportuna en limitaciones de taño en ese estilo (salvo por la secciones necesarias para las salidas y entradas de flujos de fluido). Con lo que en función de una distribución de rociadores se estima el tamaño del diámetro. El diámetro mínimo del condensado será de 600 mm por razones de mantenimiento.

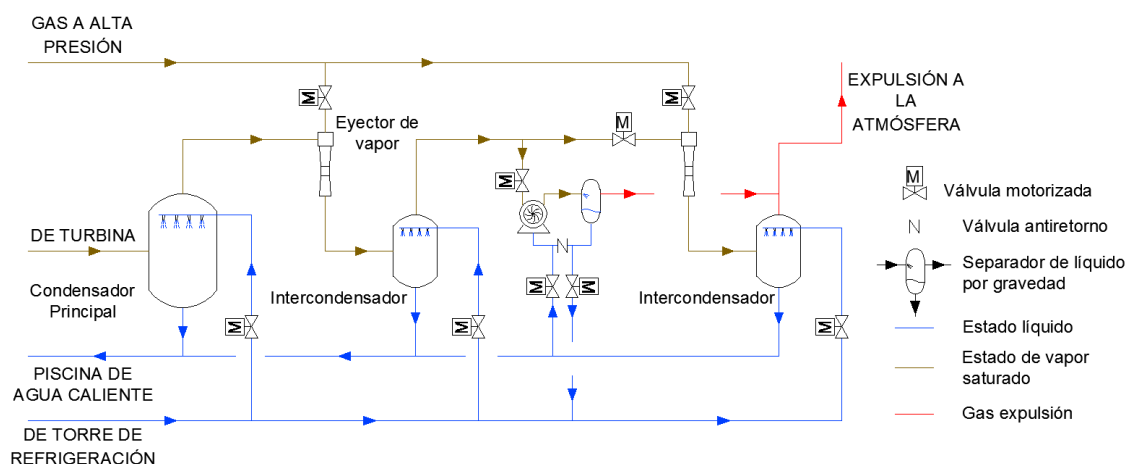
La caída de presión en el interior del condensador será del condensador de 0.01 bar, se estima una velocidad de salida de condensado de entre 2-3 m/s por gravedad, se estiman velocidades de entrada del vapor de determina el HEI y la salida de incondensables variará en función del vapor motriz que se utiliza en el interior del eyector de vapor. Para mayor detalle visualizar el anexo de cálculos 2.

Los caculos de la necesidad del refrigerante del anexo 1 son estimaciones preliminares antes del cálculo más refinado del anexo 2.

11.4.6 EXTRACCIÓN DE INCONDENSABLES. CONDICIONES DE CALCULO

El tipo de extracción elegida un sistema híbrido de eyectores de vapor más apoyo auxiliar de una bomba de anillo líquido. Se ha elegido este tipo de sistema por el bajo mantenimiento de diseño, su posibilidad de trabajar con altos caudales de incondensables. Los eyectores de vapor al carecer de elementos mecánicos, se reduce su mantenimiento y una vez instalados son muy robustas.

Esta doble configuración es útil por varias razones. En modo de funcionamiento normal no consumen los eyectores de vapor, además su configuración es sencilla y fácil de controlar. En caso de que las condiciones de vacío se alteren entra en funcionamiento de la bomba de anillo líquido o en arranques del sistema de extracción.



A la hora de calcular el sistema no se tiene en cuenta la bomba de anillo líquido ya es seleccionada en función del caudal de incondensables y la presión de vacío que se requiere. Por tanto se seleccionaría para mantener una presión de vacío en el interior del condensador de 0.07 bar y el caudal variará en función del caudal que salga del condensador. Sólo entraría en funcionamiento en el arranque de la central o cuando las condiciones de funcionamiento se vea alteradas. Por lo que su utilización será más escasa.

Como hipótesis de cálculo se considera que:

- los incondensables se consideran principalmente aire para calcular las dimensiones.
- los cálculos de las necesidades de vapor son desarrollados a través de tablas, las cuales plantean coeficientes en función de las condiciones de temperatura y de el tipo de sustancia que es (peso molecular).
- La cantidad de etapas depende del coeficiente de compresión del eyector. Para no provocar problemas de inestabilidad los coeficiente de compresión de los eyectores debe ser inferior a 10.

Para el diseño del eyector de vapor se considera mantener el condensador principal una presión de 0.07 bar (2 etapas) y la temperatura de operación según las recomendaciones del HEI y del libro de Hugot (libro de industria de ingeniería azucarera). Por lo cual cuando no se conocen en principio la temperatura en que funciona el eyector se considera 3°C por debajo del líquido de refrigeración a la entrada del eyector (incondensables más vapor arrastrado) y la temperatura de operación del eyector de vapor de 2 grados de por encima del líquido refrigerante.

Como ya se ha comentado para el enfriamiento de los gases incondensables y la condensación de la mayor cantidad de vapor de agua se utiliza dos etapas con dos eyectores de vapor. No se deduce en principio la presión interetapa entre un eyector y el siguiente. Pero lo que se sabe es, la presión a la salida del segundo eyector de vapor será de 1.05 bar. Al pasar el segundo intercambiador la presión de los vapores no incondensables será de 1.05 bar.

Para determinar la presión interetapa, según la experiencia del HEI se estima que como aproximación será calculando la relación de compresión total de los dos eyectores, haciendo su raíz y multiplicando por 1,2. Así sacaremos el valor de la relación de compresión de la primera etapa y con eso las dos presiones.

El vapor motriz introducido en los eyectores para arrastrar los incondensables se considera en iguales condiciones de presión y temperatura en los dos eyectores pero en diferente proporción de caudales según se necesita.

El procedimiento de cálculo a seguir es:

- En función de la ley de Dalto se halla la cantidad de vapor arrastrado con los incondensables

$$M_{mv} = \frac{P_{vH_2O}}{P_{op} - P_{vH_2O}} \cdot \frac{M_{nc} \cdot 18}{PM_{nc}}$$

Ecuación 5. Ley de dalton para presiones parciales, despejada [6]

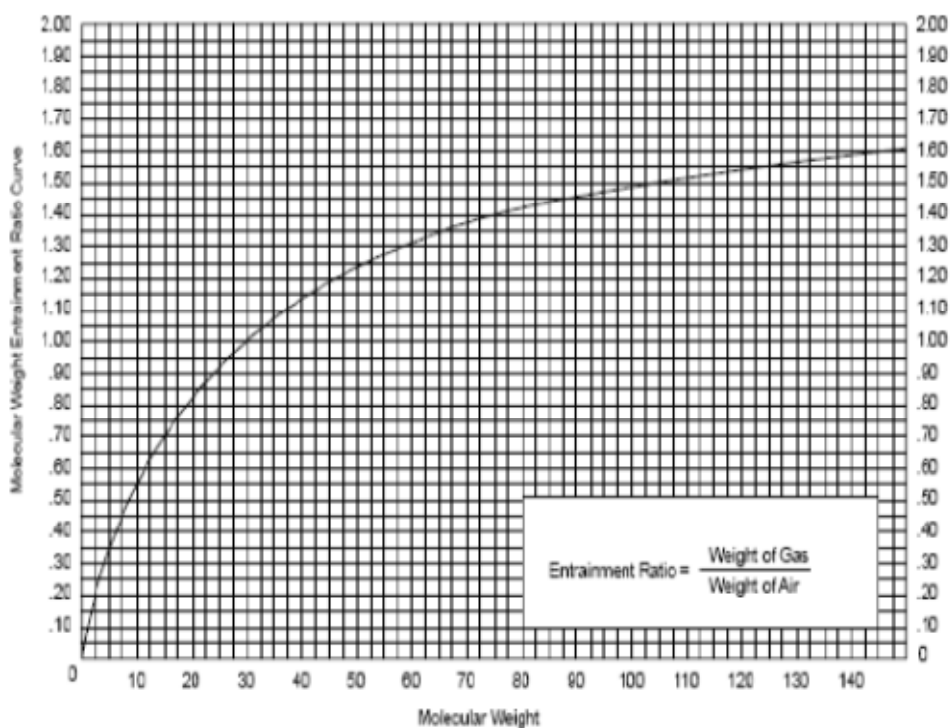
- El paso es encontrar la relación de arrastre para los gases incondensables y el vapor de agua. Es decir, el peso equivalente (DAE) del vapor de agua y de los incondensables absorbido por el eyector de vapor. En el peso del vapor respecto del aire (elemento más predominante de los no incondensables) y en función de la temperatura a la que se encuentra el eyector de vapor.

$$W_{DAE_{vw}} = \frac{M_{vapor}}{R_W \cdot R_T}$$

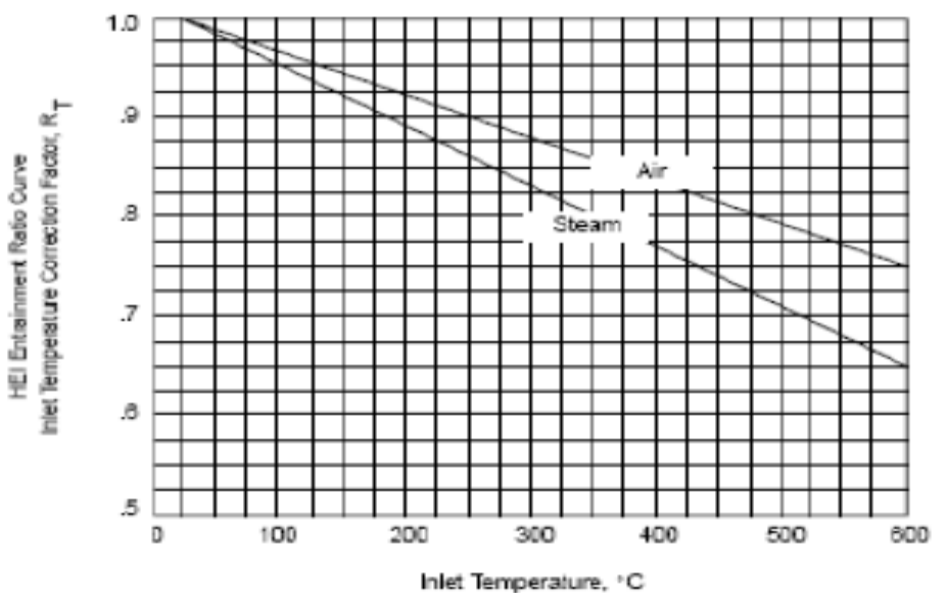
Ecuación 6. Vapor equivalente arrastrado al eyector de vapor [6]

$$W_{DAE_{nc}} = \frac{M_{no-condensables}}{R_W \cdot R_T}$$

Ecuación 7. incondensables equivalente arrastrado al eyector de vapor [6]



Gráfica 1. Cálculo del coeficiente R_t [6]

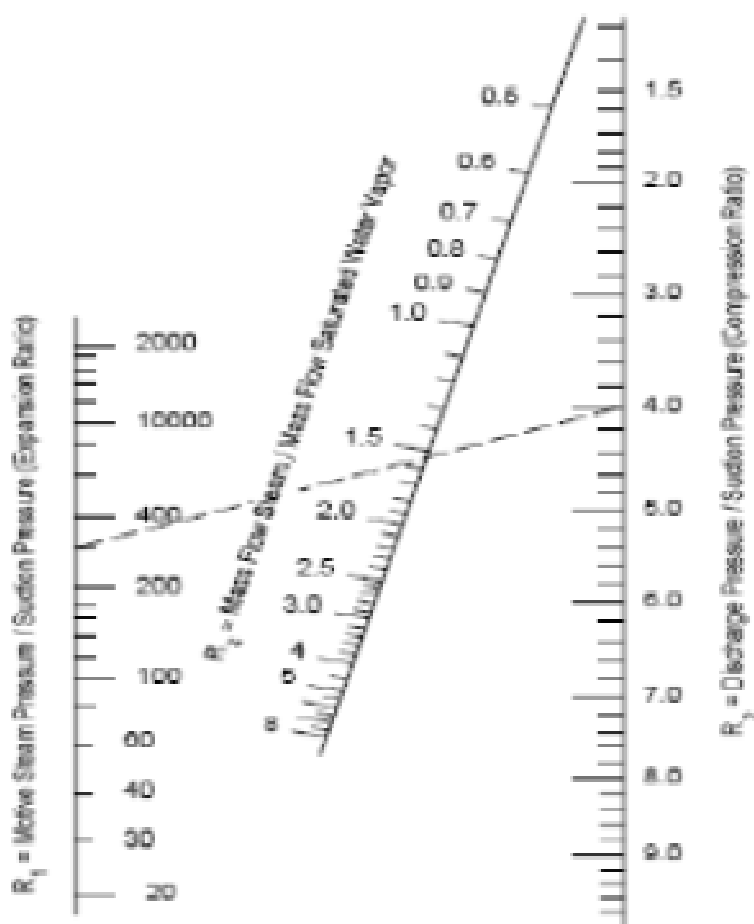


Gráfica 2. Cálculo del coeficiente R_W [6]

- A continuación se suma el equivalente total del vapor de agua y de los gases incondensables.

$$W_{DAE_TOTAL} = W_{DAE_vw} + W_{DAE_nc}$$

- Se procede a hallar la relación de compresión entre la presión de succión y la presión de descarga en cada etapa.
- Después se halla la relación de expansión del flujo, es decir, el ratio entre la presión del vapor motriz (el vapor utilizado para extraer los incondensables) y la presión de succión.
- A partir de los datos obtenidos se puede hallar la cantidad flujo motriz necesario para extraer los incondensables



Gráfica 3. Nomograma para hallar R_3 [6]

$$W_{MOTRIZ} = W_{DAE_TOTAL} \cdot R_3 \cdot R_w \cdot R_T$$

Ecuación 8. Cantidad de flujo motriz para un vapor equivalente arrastrado

Para hallar las dimensiones del eyector nos basaremos en el volumen específico del aire, el volumen específico del vapor respecto al aire es minúsculo. Además para las velocidad de la salida de incondensables nos basaremos en el libro de Hugot, el cual

muestra velocidades recomendadas para el vapor. Además koerting utiliza estas recomendaciones de diseño para dimensionar los eyectores.

Lo primero será hallar mediante un balance la velocidad en el estrangulamiento.

$$W_{DAE_TOTAL} \cdot velocidad_{DAE_TOTAL} + W_{MOTRIZ} \cdot velocidad_{MOTRIZ} = (W_{DAE_TOTAL} + W_{MOTRIZ}) \cdot velocidad_{mezcla}$$

En función de la velocidad y el flujo másico se determina el diámetro del estrangulamiento

$$masa = densidad \cdot velocidad \cdot area$$

$$area = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4}$$

En función de ese diámetro y la siguiente tabla se determinan las demás medidas

REF.	LONGITUD				ÁNGULO (°)	
TEORÍA	GARGANTA	DIFUSOR	LONGITUD TOTAL	DESDE EL INYECTOR AL FINAL DE CONICIDAD	CONVERGENTE	DIVERGENTE
SÍMBOLO	D_T	R	S	X	α	θ
Kravath (año 1940)	$1 \cdot D_T$	$12 \cdot D_T$	$15 \cdot D_T$	$2 \cdot D_T$	28	5

Tabla 3. Longitudes de los eyectores a partir de la dimensiones de sus garganta [5], [25]

Para mayor detalle consultar anexo de cálculos 4.

11.4.7 BOMBA

Entonces la elección más favorable sería la ESP, porque aunque impulse menos caudal, podemos obtener mayor presión disponible. Además las condiciones de aspiración no son tan agresivas, ya que la utilizaremos para impulsar el fluido al yacimiento en vez de aspirarlo. Además si se necesita más caudal se pueden poner varias bombas en paralelo absorbiendo de la piscina de condensados de la central.

Para el obtener las condiciones de funcionamiento favorables se estima que la bomba debe impulsar el mismo caudal de agua que a la entrada, pero con un 25% extra debidos a las pérdidas de agua a lo largo del recorrido. El líquido que si impulsa de nuevo al yacimiento es de la piscina de agua caliente, la cual está en contacto con la atmósfera y una temperatura aproximadamente de unos 70°C. Si no se hubiese



conseguido se debe pasar recuperación de calor por la piscina. Si se impulsa líquido a menor temperatura provocaría inestabilidades en el yacimiento.

Se impulsará a una presión como la que requiera la salida del yacimiento, ya que se carece de bomba de extracción. Esto posibilita que se pueda impulsar todo el líquido que se necesita para aumentar la potencia, y por tanto el yacimiento solo se encarga de elevar la temperatura a la de saturación. Para las pérdidas del 25% del fluido se inyecta parte del líquido de la piscina de refrigeración.

No se consideran pérdidas de carga en el transporte de este estudio por la falta de datos relacionados con los datos de fricción y condiciones del yacimiento, además de no ser el objeto de este proyecto.

Para mayor detalle revisar anexo de cálculos 1.

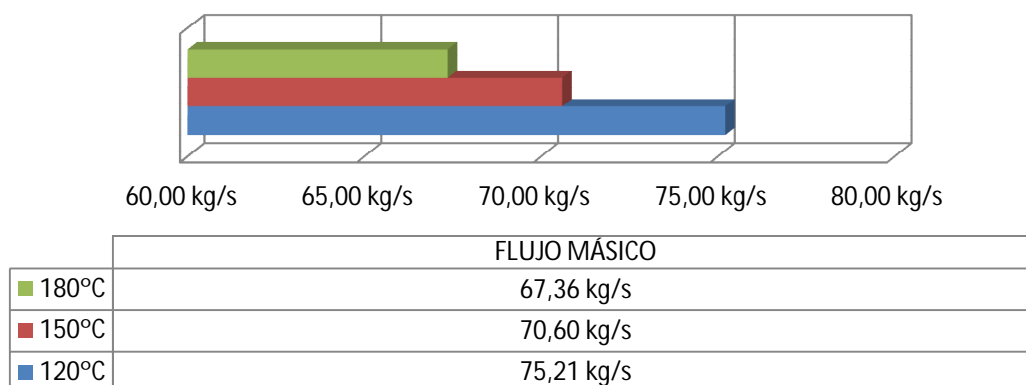
12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se ha realizado un estudio de el comportamiento de la central geotérmica para varias posibilidades, en la que los objetos de estudio (principalmente el condensador y los eyectores de vapor son los protagonistas.

Se somete a un análisis teórico de como se comportaría la central a 3 temperaturas de explotación del yacimiento (120°C, 150°C y 180°C). Exponiendo la posibilidad de que el yacimiento por el paso de los años comenzase producir menos potencia térmica o simplemente se tuviese un yacimiento de menor entalpía y se quisiese utilizar apoyado de una caldera de biomasa.

En primer lugar se quiere mostrar que debido a los rendimientos isentrópicos, mecánicos y eléctricos una turbina de 25 MWe necesita generar una potencia térmica de 46.3 MW. Una potencia de 46,3 MW para un yacimiento que no carecen de calderas para generar altas temperaturas de vapor (500°C) de funcionamiento consiste en una necesidad de flujo másico mayor en el yacimiento para obtener esta potencia.

FLUJO MÁSICO PARA 25 MWe

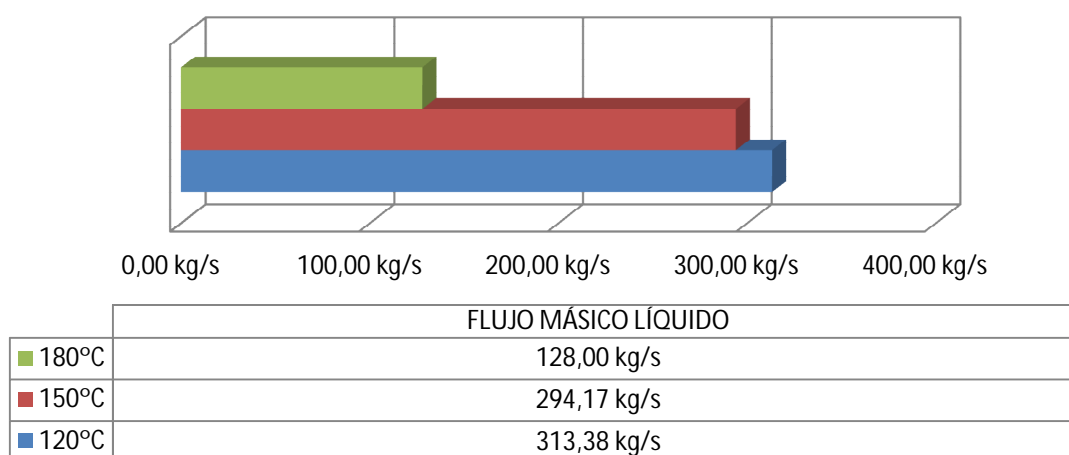


Gráfica 4. Comparación de flujo másico de gas a 25 MWe

Como se puede observar la necesidad de vapor se según se aumenta de temperatura de en la que central geotérmica reduce la cantidad necesaria de vapor. Lo cual influye en que los demás componentes de la central reduzcan su potencia y consumo.

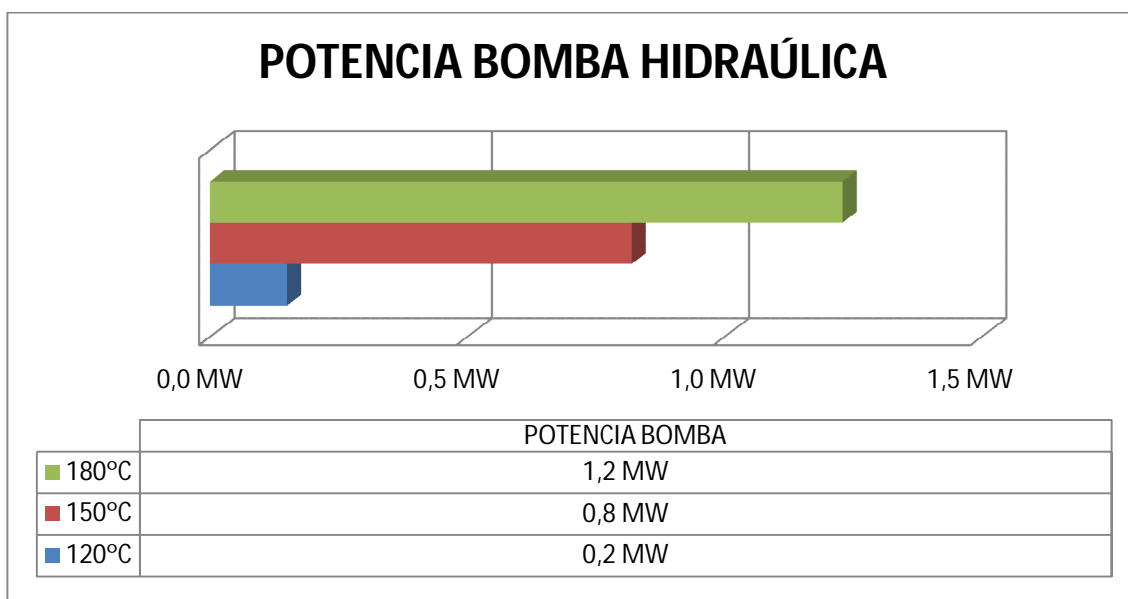
Aquí se ha mostrado la necesidad de vapor, pero hay que recordar que el título de vapor es de 0.3, por lo que la cantidad de fluido a introducir en la central sería muchísimo mayor , para un yacimiento de temperatura más baja.

FLUJO LÍQUIDO DE BOMBA

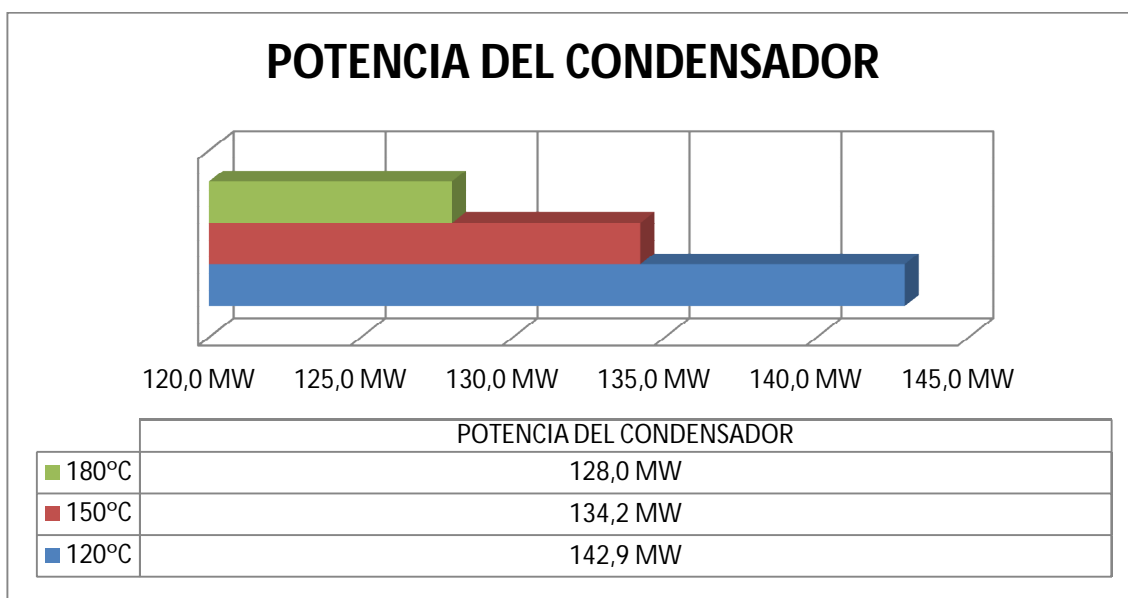


Gráfica 5. Comparación de flujo líquido de la bomba.

La potencia necesaria en la bomba hidráulica es ligeramente mayor, pero como podemos ver la potencia necesaria en el condensador se reduce a más velocidad.



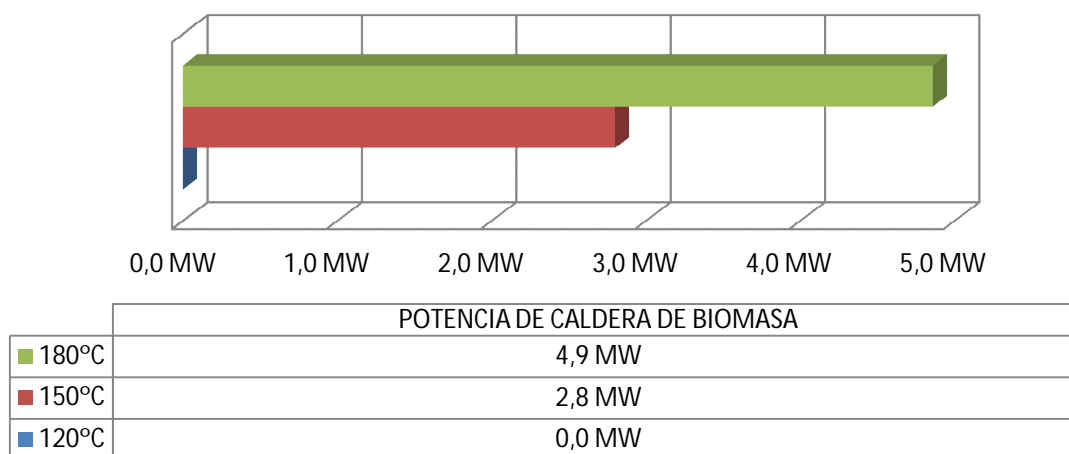
Gráfica 6. Comparación de potencia de la bomba hidráulica



Gráfica 7. Comparación de potencia del condensador.

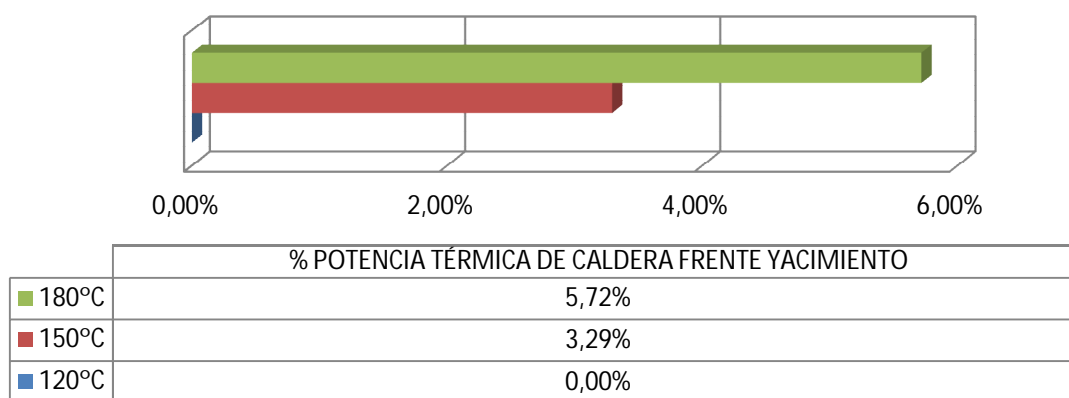
Como se observa si se usa una caldera de biomasa en caso que el yacimiento de Roquetas del mar bajase su producción o se hubiese encontrado un yacimiento con potencial geotérmico pero de menor temperatura sería la solución. Necesitaría componentes de menor potencia y además la potencia de la caldera de biomasa con comparación a la del yacimiento (85 MW).

POTENCIA DE CALDERA DE BIOMASA



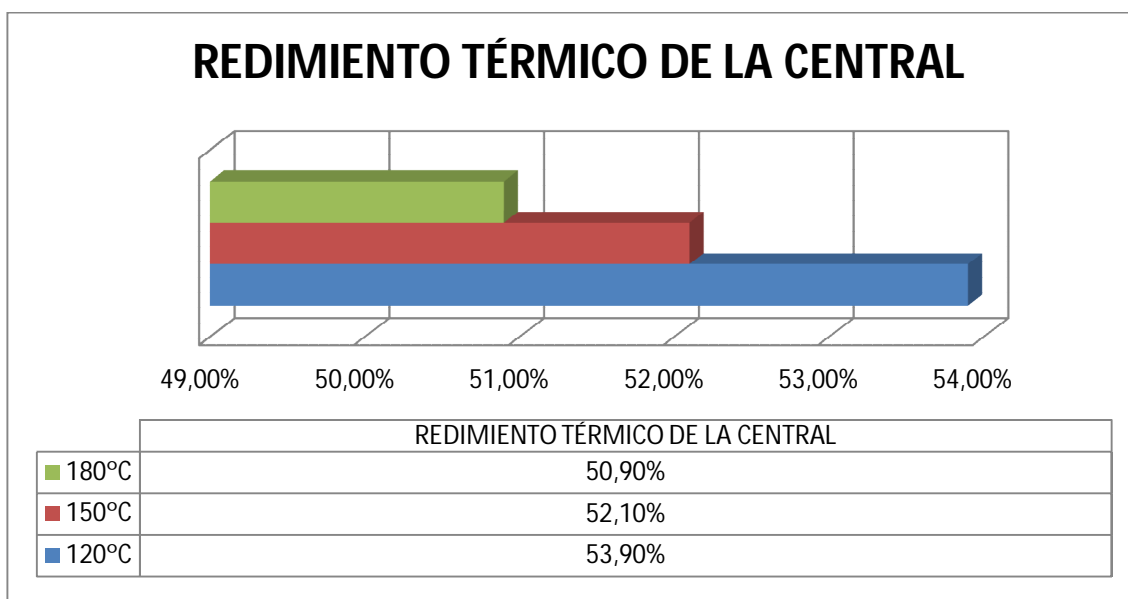
Gráfica 8. Comparación de potencia de la caldera de biomasa.

% POTENCIA TÉRMICA DE CALDERA FRENTE YACIMIENTO



Gráfica 9. Comparación % de potencia térmica de caldera frente yacimiento

El rendimiento de la instalación es ver dad que es ligeramente menor, pero merece la pena ya que los componentes están menos exigidos lo que significa una mayor vida útil además de un coste menor de la instalación. Además debido a la disposición de componentes de la central se tiene rendimientos altos para una central Rankine.



Gráfica 10. Comparación de rendimiento térmico de la central

Es de comentar que estos altos rendimientos son debidos a las condiciones de vacío del condensador y a la turbina de condensación , las cuales permiten una mayor de expansión del vapor.

Todos los números son sacados del anexo de cálculo 1

12.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL SISTEMA DE CONDENSACIÓN

En esta tabla en principio se muestran los parámetros más destacables del condensador principal y de los intercondensadores con un flujo de vapor que se ha utilizado a 120°C.

CONDENSADOR PRINCIPAL

POTENCIA TÉRMICA	142.9 MW
CANTIDAD DE VAPOR A CONDENSAR	49.42 kg/s
NECESIDAD DE REFRIGERANTE	3676 kg/s
ALTURA CONDENSADOR	4.84 m
SECCIÓN ENTRADA DE VAPOR	3.5 m
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE	1.25m
SECCIÓN SALIDA INCONDENSABLES	0.33 m
SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA	1.27 m
ALTURA PIERNA BAROMÉTRICA	9.20 m
NÚMERO DE ROCIADORES	234
DIÁMETRO DEL CONDENSADOR	4.01 m

Tabla 4. Resumen de los parámetros más característicos del condensador principal, (120°C)

INTERCONDENSADOR 1

PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO (SATURADO)	0.33 bar (71 °C)
PORCENTAJE DE INCONDENSABLES	2 %
POTENCIA TÉRMICA	30.11 MW
CANTIDAD DE VAPOR A CONDENSAR	1.578 kg/s
NECESIDAD DE REFRIGERANTE	76.03 kg/s
ALTURA CONDENSADOR	3.63 m
SECCIÓN ENTRADA DE VAPOR	0.32 m
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE	0.2 m
SECCIÓN SALIDA INCONDENSABLES	0.207 m
SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA	0.183 m
ALTURA PIERNA BAROMÉTRICA	9.2 m
NÚMERO DE ROCIADORES	5
DIÁMETRO DEL CONDENSADOR	0.6 m

Tabla 5. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 1, (120°C)

INTERCONDENSADOR 2

PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO (SATURADO)	1.05 bar (101°C)
PORCENTAJE DE INCONDENSABLES	2 %
POTENCIA TÉRMICA	10.19 MW
CANTIDAD DE VAPOR A CONDENSAR	0.577 kg/s
NECESIDAD DE REFRIGERANTE	25.778 kg/s
ALTURA CONDENSADOR	3.63 m
SECCIÓN ENTRADA DE VAPOR	0.11 m
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE	0.13 m
SECCIÓN SALIDA INCONDENSABLES	0.03m
SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA	0.11 m
ALTURA PIERNA BAROMÉTRICA	9.2 m
NÚMERO DE ROCIADORES	2
DIÁMETRO DEL CONDENSADOR	0.6 m

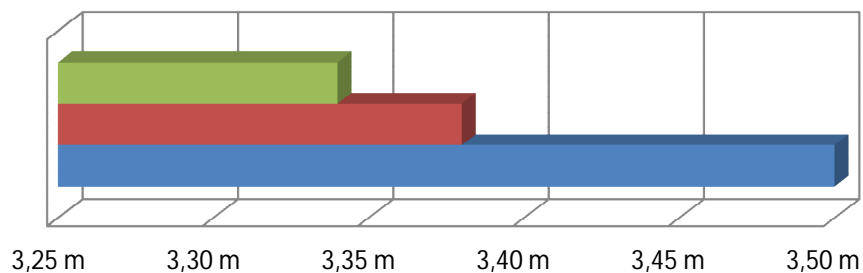
Tabla 6. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 2, (120°C)

Para detalles sobre cálculos mirar el anexos 2 y 3. Para visualización de los condensadores mirar planos.

12.1.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CONDENSADORES PRINCIPALES

En el condensador principal , dado que el diámetro y velocidad de la gota no cambia (para comprensión revisar el anexo de cálculos 2) , además de la presión de funcionamiento no cambia la altura de la vasija y de la pierna barométrica. Sin embargo se muestran cambios en las secciones de entrada y salida de fluidos.

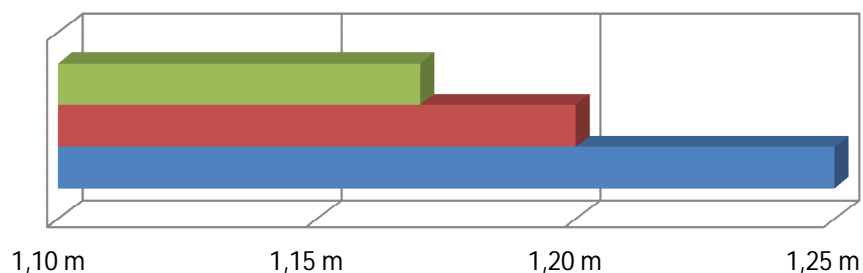
SECCIÓN DE ENTRADA DE VAPOR



	SECCIÓN DE ENTRADA DE VAPOR
■ 180°C	3,34 m
■ 150°C	3,38 m
■ 120°C	3,50 m

Gráfica 11. Comparación de sección de entrada de vapor del condensador principal.

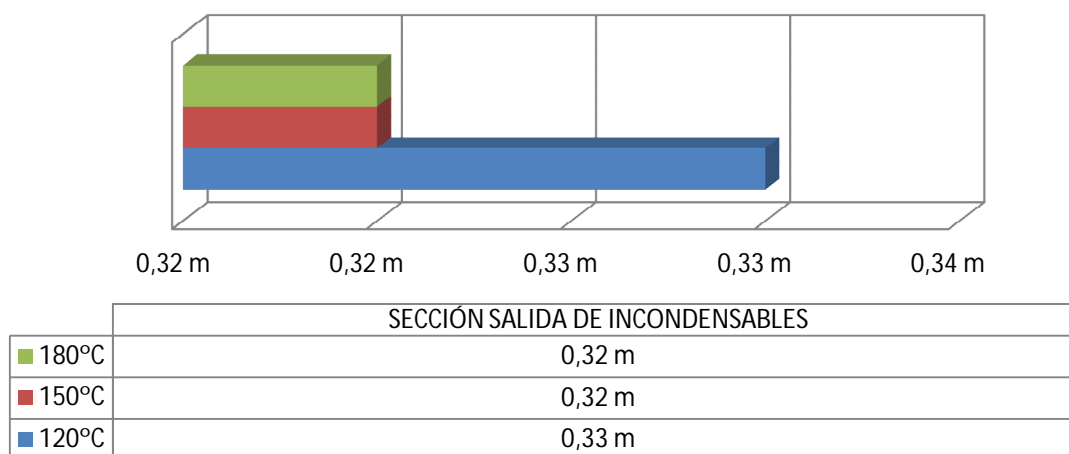
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE



	SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE
■ 180°C	1,17 m
■ 150°C	1,20 m
■ 120°C	1,25 m

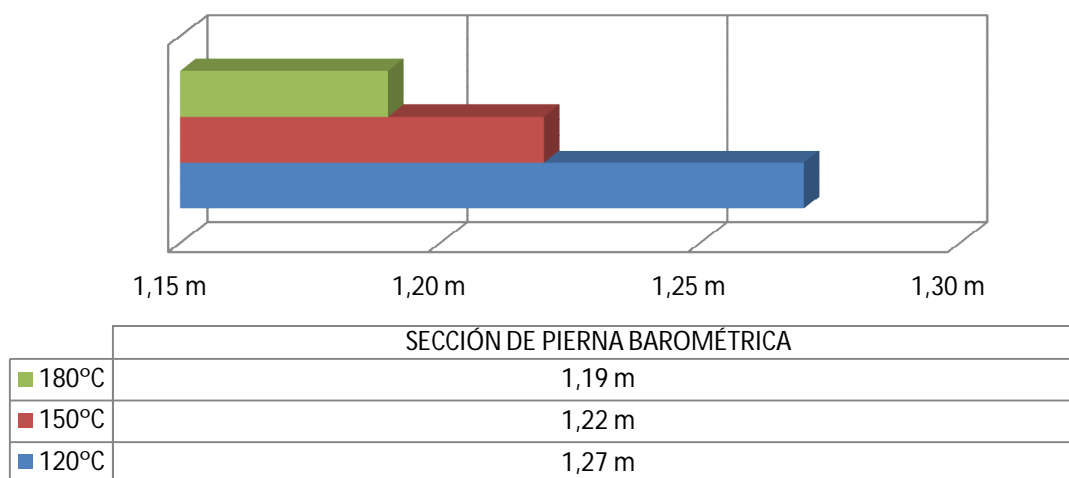
Gráfica 12. Comparación de sección de entrada de refrigerante del condensador principal.

SECCIÓN DE SALIDA DE INCONDENSABLES



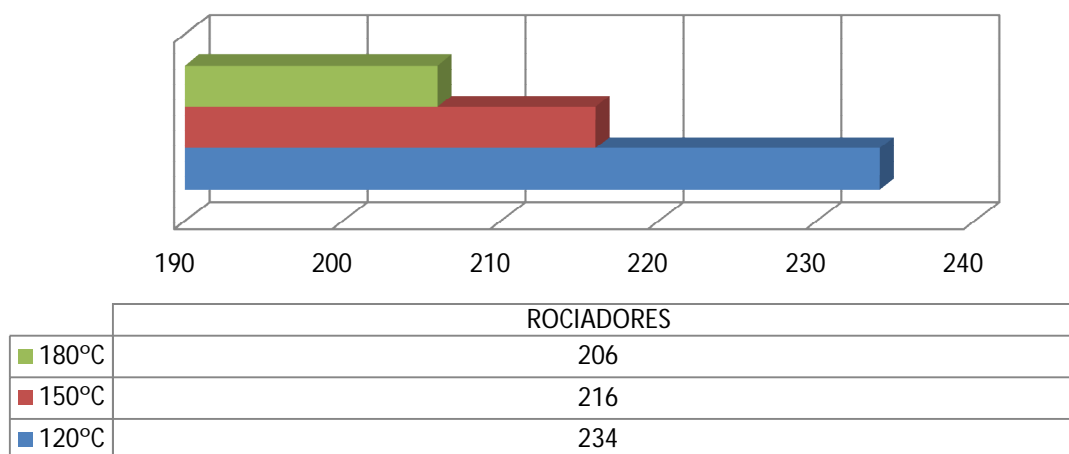
Gráfica 13. Comparación de sección de salida de incondensables del condensador principal

SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA



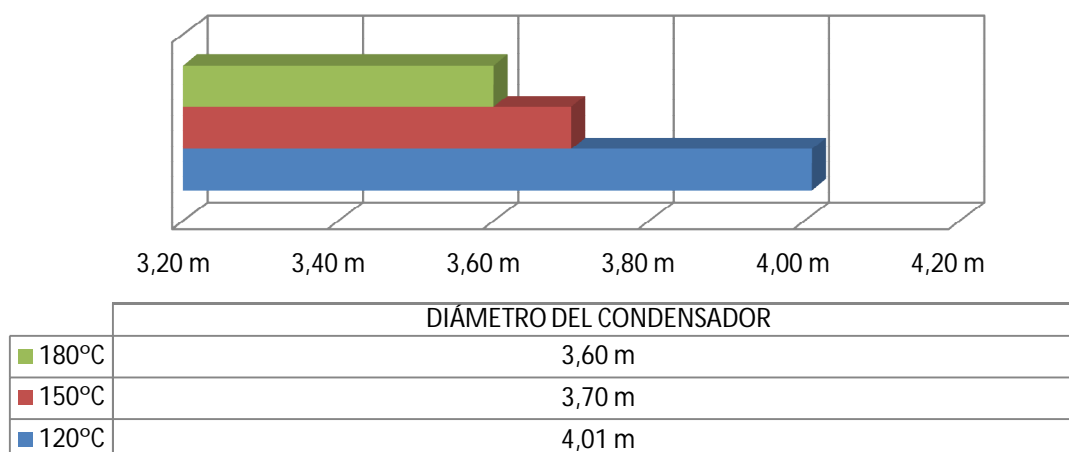
Gráfica 14. . Comparación de sección de pierna barométrica del condensador principal.

NÚMERO DE ROCIADORES



Gráfica 15. . Comparación de número de rociadores del condensador principal.

DIÁMETRO DEL CONDENSADOR



Gráfica 16. Comparación de diámetro del condensador Principal.

Se puede observar que la disminución dependen de del flujo másico que entre en el condensador, por lo que a mayor potencia térmica entre el yacimiento y la caldera , la potencia térmica del condensador será menor.

12.2 ÁNALISIS DE SENSIBILIDAD DE DIMENSIONES DE EYECTORES DE VAPOR

Las dimensiones de los eyectores de vapor también se ven disminuidas como se puede observar. Sólo se muestran como ejemplo los eyector 1. Para mayor comprensión DE de los cálculos revisar el anexo de cálculos 4.

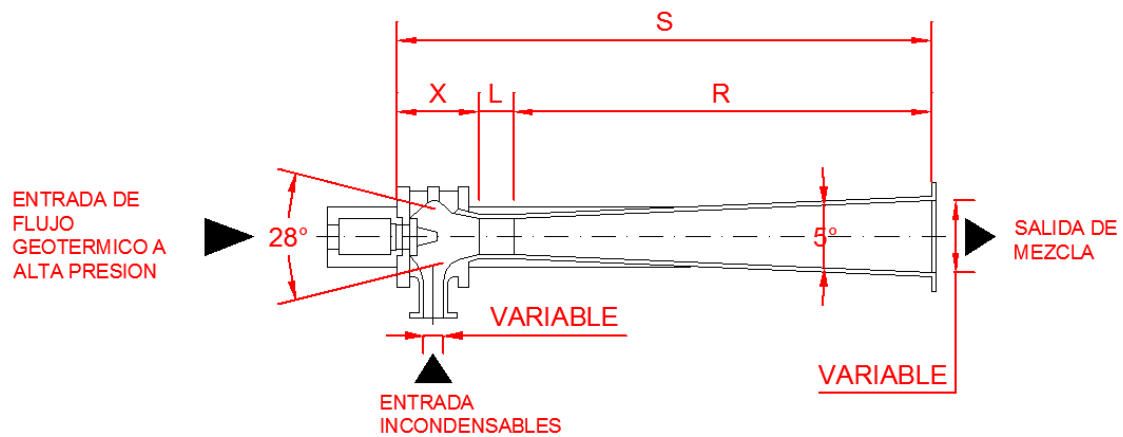
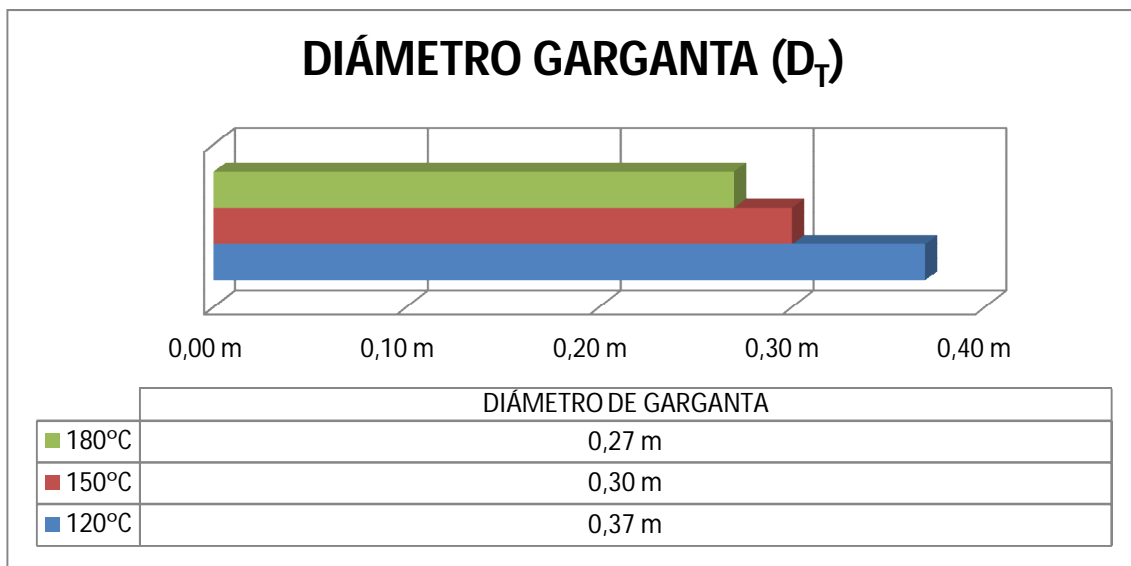
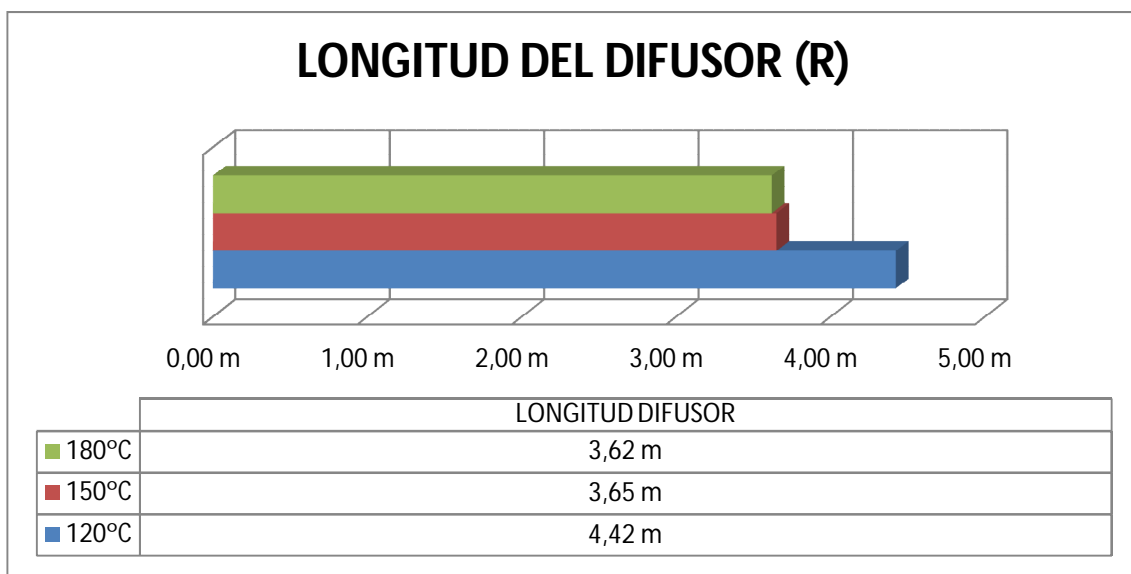


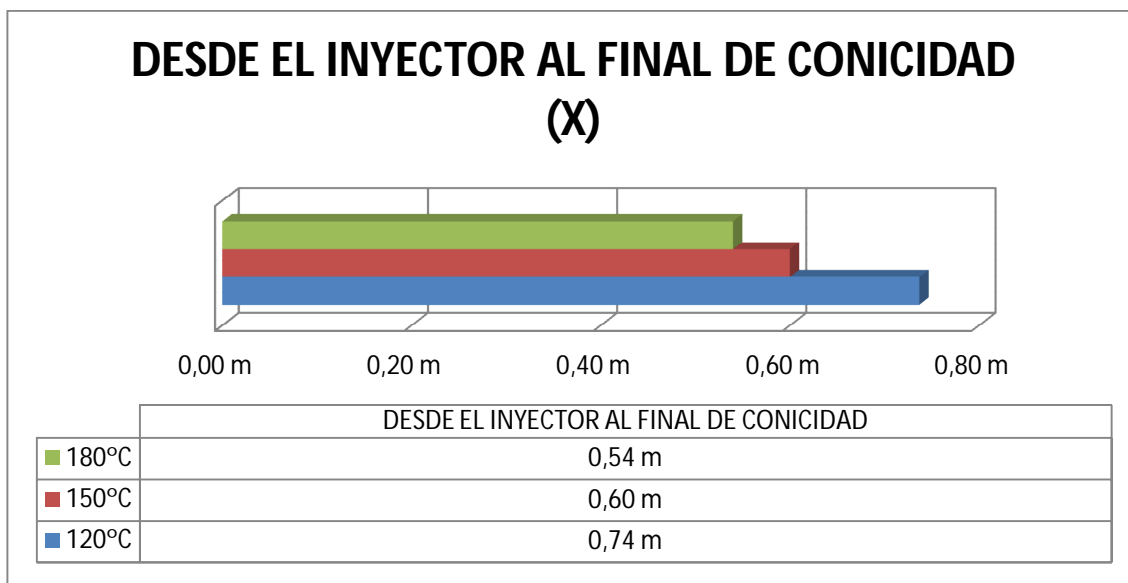
Figura 72. Representación del eyector de vapor diseñado



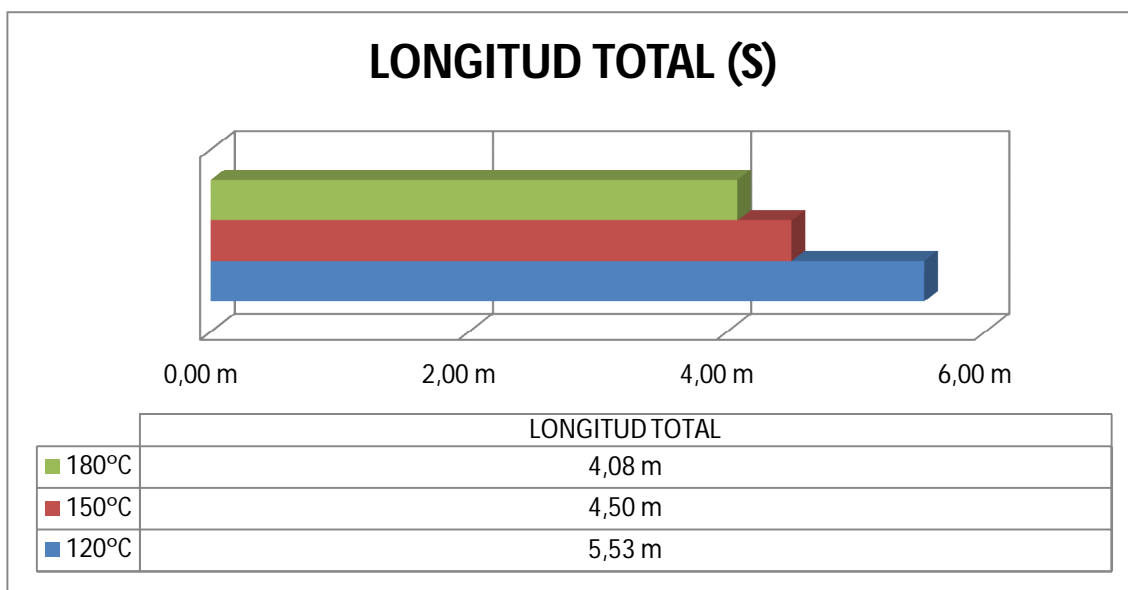
Gráfica 17. Comparación de diámetro de garganta del eyector de vapor.



Gráfica 18. Comparación de la longitud del difusor del eyector de vapor.



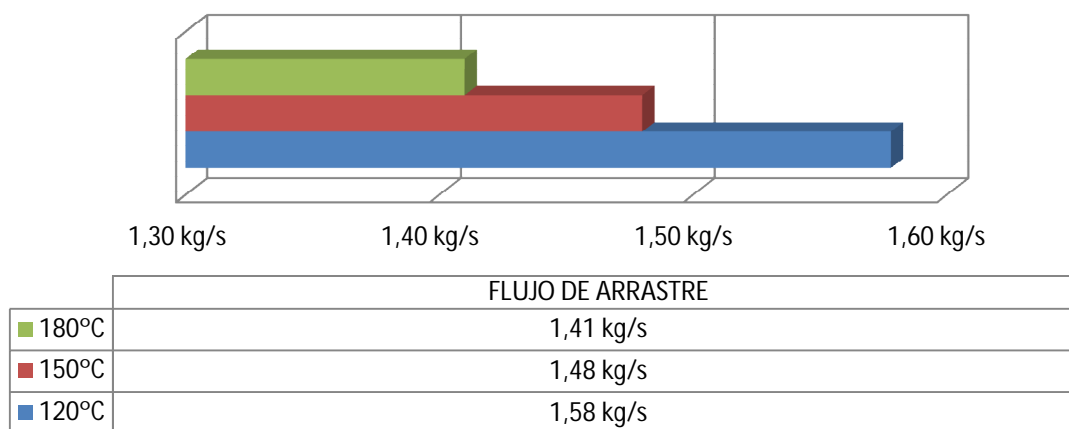
Gráfica 19. Comparación de la longitud desde el inyector al final de la conicidad del eyector de vapor.



Gráfica 20. Comparación de la longitud total del eyector de vapor.

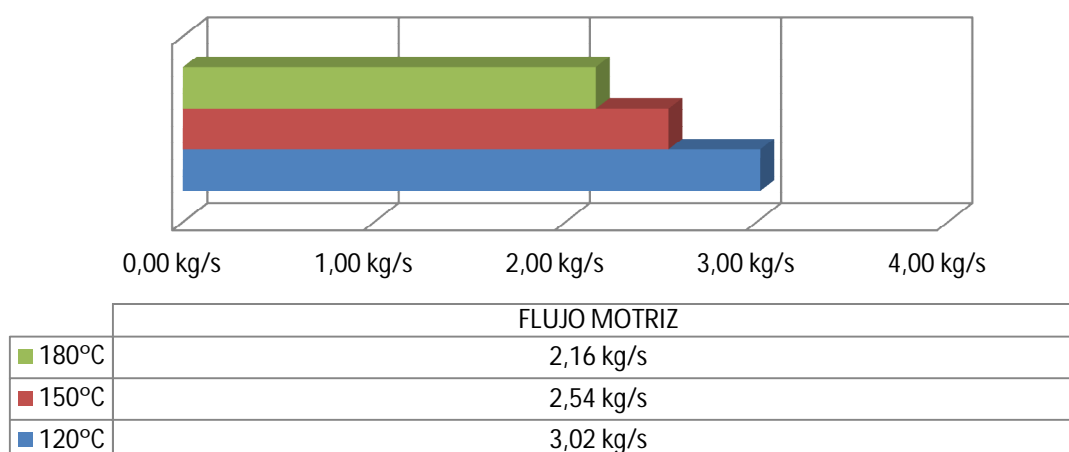
Estos resultados se sacan en función de la velocidad y el flujo másico del eyector. El flujo másico de arrastre es el procedente del condensador y el flujo motriz es el alta presión antes de llegar a turbina.

FLUJO DE ARRASTRE



Gráfica 21. Comparación del flujo de arrastre del eyector de vapor.

FLUJO MOTRIZ



Gráfica 22. Comparación del flujo motriz del eyector de vapor.



13. CONCLUSIONES

El proyecto presente ha querido presentar mediante un estudio teóricos como las centrales geotérmicas pueden ser instaladas en un mayor número de yacimientos. Como nada demuestra mejor la opción de este tipo de centrales que los resultados sólo hay que mirar a los resultados para convencerse de que es una idea atractiva.

Como vemos con el tipo de elementos seleccionados se obtiene un rendimiento de Carnot de aproximadamente de 50%. Rendimiento muy interesante ya que en las centrales de tipo Rankine se ronda entre un 35%-40% de manera general. Estas características principalmente por el alto coeficiente de expansión de la turbina. Al ser un turbina de condensación puede alcanzar presiones de vacío. Aunque no serviría de nada si el condensador no siguiese unas condiciones de vacío para absorber el vapor de la turbina.

El vacío del condensador es debido al diseño de una pierna barométrica para deshacerse de condensado y el sistema de extracción de incondensables para arrástralos fuera del eyector.

El condensador barométrico de contacto directo de potencias por encima de los 100 MW de requeriría de un condensador de superficie, necesitaría un mayor número de área de transferencia, lo cual se traduce principalmente en un mayor numero y recorridos de tuberías. Esto como todo, se traduce en un mayor presupuesto necesario para el desarrollo del condensador.

El sistema de extracción de gases además de poder trabajar con altos caudales de incondensables, posibilita poder tener una instalación robusta y de bajo mantenimiento, que en caso funcionamiento irregular se puede ayudar de una bomba de vacío la cual en poco tiempo equilibre el sistema.

En resumen, es una opción que debería ser sometida a análisis para un mayor detalle de las capacidades e inconvenientes de este tipo de obtención de energía. ya que este es una investigación teórica de una central geotérmica .



14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- [1] Process Heat Transfer- G. F. Hewitt, G. L. Shires, T. R. Bott, 1994, pp 643-745.
- [2] Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants- Ernest E. Ludwig, Vol. 1, 2001, pp 343-393.
- [3] Handbook of Cane Sugar Engineering- E. Hugot, 1986, pp 868-910.
- [4] Geothermal Power Plants. Principles, Applications and Case Studies- R. Dipippo, 2005 pp 62-71, 85-115, 309-324.
- [5] Standards for Direct Contact Barometric and Low level Condensers- Heat Exchange Institute, 7 Edition, 2004.
- [6] Standards for Steam Jet Vacuum Systems- Heat Exchange Institute, 5 Edition, 2000.
- [7] The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States- Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [8] Fluidization Engineering- Daizo Kunni, 1991, pp 15-20.
- [9] Thermodynamic Analysis of Preliminary Design of Power Plants Unit I Patucha, West Java, Indonesia- Report of geothermal Training Programme, 2006.
- [10] Evaluation of Steam jet Ejectors- Report of Chemical Engineering and Processing, 2002.
- [11] Fundamentals of Vacuum Technology- Oerlikon leybond vacuum, 2007, pp 9-46, 76-96.
- [12] Guidelines for Optimum Gas Extraction System Selection. University of Iceland- M. A. T. Millachine, 2011.
- [13] Utilización de Técnicas de Sondeos en Estudios Geotectónicos- J. H. Herbert, J. C. Gómez, 2012, pp 5-10, 22-25.
- [14] Yacimientos Geotérmicos Estimulados. Potencial en España- II Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria, J. S. Guzmán, 2010.
- [15] Biomasa Industria- IDAE, 2008.
- [16] Manual Geotermia- IDAE, 2008.
- [17] Fundamento de Transferencia de calor- F. P. Incropera, D. P. DeWitt, 1981, pp 535-568, 827-852.



- [18] Fundamentos de Termodinámica Técnica- M. J. Moran, J. H. Shapiro, Vol. 1, 1995, pp 361-371.
- [19] Energía Geotérmica - J. Pous, L. Jutglar, 2004, pp 45-63, 66-117.
- [10] La Producción de Energía mediante Vapor de agua, el aire y los gases- W. H. Severns, H. E. Degler, J. C. Miles, 1982 ,pp 315-339.
- [21] "Apuntes máquinas y centrales térmicas, Universidad Politécnica Carlos III de Madrid"- Mathieu Legrand, 2012.
- [22] "Diseño y evaluación de separadores bifásicos y trifásicos"- M. F. Mauricio, Universidad central de Venezuela, 2006.
- [23] Estudio de los Recursos Geotérmicos en Andalucía- Consejería de Economía, Innovación y ciencia, 2009.
- [24] Análisis y Control de Erosión en Turbina de Partículas Sólidas en los Elementos del Sistema de Flujo de Turbinas de Vapor- Z. M. Czerwicz, Instituto de investigaciones Electricas, México, 2012.

- SOFTWARES EMPLEADOS

Mathcad v.15

AUTOCAD v. 2010

Microsoft Office Excel v. 2007

- PÁGINAS WEB VISITADAS

[25] <http://www.s-k.com/>- Página Web de Schutte & koerting.

[26] <http://www.pnr.it/>- Página Web de PNR Italia.

[27] <http://www.geape.es/gpees/cmsdoc.nsf/webdoc/webb7zdpnn>- Página Web de GEA.

[28] <http://www.equirepsa.com/>- Página Web de Eeuirepsa.

[29] http://www.flowserve.com/es_es- Página Web de Flowserve

[30] <http://www.peerlesseurope.com/silencers.htm>- Página Web de Peerless Europe

[31] <http://www.alfalaval.com/Pages/default.aspx> - Página Web Alfa Laval.

[32] <http://www.nashindia.com/>- Página Web de Nash

[33] <http://www.tlv.com/global/LA/>- Página web de TLV



[34] <http://www.siemens.com/entry/cc/en/> - Página Web Siemens Industrial.

[35] <http://www.hpe-technology.com/es/> - Página Web de HPE



ÁNEXO 1 (CÁLCULO CENTRAL GEOTÉRMICA ESTANDAR)

Se muestran los balances que determinan de una forma estimativa los consumos y potencias de los elementos fundamentales de la central. Se muestra de manera detallada el cálculo de la central para un fluido geotérmico que proceda de un yacimiento a 120 °C, 150 °C y 180°C. Se muestra el cálculo del modo de 120 °C y los resultados de los demás ya que el procedimiento es el mismo , pero cambian los resultados.

CENTRAL GEOTÉRMICA ESTANDAR A 120°C

En función de la numeración en cada instante de recorrido del fluido caloportador, se basa para la nomenclatura de los cálculos. (Mirar plano 1, para seguimiento)

Como se puede apreciar estamos ante un ciclo Rankine, donde el yacimiento geotérmico es el generador de vapor; la turbina transforma energía cinética en mecánica y el generador transforma esa energía mecánica en eléctrica; tenemos un condensador y una bomba que impulse el agua condensada al yacimiento.

Como elemento excepcional se tiene el separador ciclónico y de humedad que separarán el líquido del gas de producción y además si todavía persiste una neblina de gotas de líquido se distinguirá del gas.

- CÁLCULOS DE CENTRAL

Para poder partir de algún dato restringiremos nuestra central a una potencia de 25 MWe. Cuando se habla MWe, queremos decir que son después de multiplicar por el rendimiento isentrópico, mecánico y eléctrico por la potencia de la turbina.

➤ TURBINA

Por ser una turbina de condensación y según los datos de fabricantes como Siemens se puede situar el rendimiento isentrópico de la turbina en un 90 %. El rendimiento mecánico de la turbina se sitúa en un 80 %. Se puede estimar de una manera positiva el rendimiento será de un 75%.

Los datos de partida a la salida del separador ciclónico será agua saturada con un título de vapor de 1 y una temperatura de 120 °C de lo que deducimos que tiene el vapor exclusivamente. Además debido a que es una turbina de condensación el agua saturada tendrá un título de vapor de 0.8 a la salida de la turbina. La presión , como se puede advertir será también baja, alrededor de 0.07 bar.

Con estos datos se estima en principio, la cantidad de masa de vapor necesaria para obtener 25 MWe.



Se engloba la turbina en un volumen de control. Para resolverlo, se tiene en cuenta que la turbina es adiabática, trabajando de manera no isotérmica, no isobárica y no isocora.

$$W_1 = m_{\text{gas}} \cdot (h_1 - h_2)$$

Al multiplicar por los rendimientos:

$$W_{1e} = \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_e \cdot m_{\text{gas}} \cdot (h_1 - h_2)$$

Para hallar el valor de la entalpía 1 se utiliza las tablas del anexo de tablas y en caso de que sea necesario se deberá hacer interpolaciones lineales. Partiendo de una temperatura de un líquido en saturación de 120 °C, y que tenemos un título de vapor de 1.

$$h_1 := 2706.310^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

A la salida de la turbina se tiene un título de vapor de 0.8 y una presión de 0.07 bar, por tanto hay dos entalpías una por líquido saturado y otra por vapor saturado, por tanto se haya la entalpía real por combinación de las dos.

$$x := 0.8$$

$$h_2 := x \cdot h_{2_vapor} + (1 - x) \cdot h_{2_liquido} = 2.091 \times 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Entonces la masa de gas a partir de los rendimientos dados, se obtiene:

$$\eta_i := 0.9$$

$$\eta_m := 0.8$$

$$\eta_e := 0.75$$

$$W_{1e} := 25\text{MW}$$

$$W_1 := \frac{W_{1e}}{(\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_e)} = 4.63 \times 10^7 \text{ W}$$

$$m_{\text{gas}} = \frac{W_1}{(h_1 - h_2)}$$

$$m_{\text{gas}} := \frac{W_1}{(h_1 - h_2)} = 75.212 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Este flujo másico de gas será el que se debe mantener constante para poder turbinar el vapor y así conseguir un mínimo de 25 MW.

➤ CONDENSADOR

El condensador se utiliza principalmente para 2 objetivos. El primero es que al condensar el vapor se consigue transportar el fluido de forma líquida y las bombas de agua funcionarán con menos problemas que si hubiese una mezcla de agua y vapor. Cuando están los líquidos en forma bifásica pueden provocar cavitación, por eso no interesa transformar el vapor en líquido. Al ser su densidad mayor, es más fácil que discurran por la tuberías por la acción de la gravedad, significando menos trabajo para la bomba. El 2º objetivo consiste en que al condensar el líquido se consigue que la presión baje. Si la presión en el condensador es más baja que a la salida de la turbina se generará un diferencial de presiones que facilita el transporte del fluido caloportador. Además al generar una presión menor garantiza que en la turbina se obtenga una mayor cantidad de energía.

Las condiciones de contorno para el condensador serán:

Primero destacar que se utiliza un condensador barométrico de contacto directo. Para esta primera estimación no tendremos en cuenta la cantidad de vapor necesaria para la extracción de incondensables y así mantener una baja presión dentro del recipiente del condensador. Se centrará en realizar balances de tal forma que nos quede claro la cantidad de refrigerante necesario para el intercambio de calor y así condensar el vapor procedente de la turbina. Además de la potencia calorífica del condensador.

Las condiciones que limitan el diseño del condensador es que dentro hay una caída de presión de 0.01 bar. Además entre la temperatura de salida del vapor ya condensado y el líquido refrigerante será de una diferencia de 10 °C, tal como aconseja la norma sobre condensadores barométricos y de bajo nivel, del "Heat Exchange Institute". Por tanto como ya podemos deducir consideramos que a la salida del condensador se tiene un líquido saturado con un título de vapor de 0 y además la presión será de 0.06 bar.

Mediante un balance sencillo de energía se estima la potencia calorífica del condensador y la cantidad de refrigerante necesaria. Teniendo en cuenta que estamos ante un aparato que trabaja de manera no isocora, no isotérmica, no isobárica y no adiabática.

$$Q_2 = (m_{\text{gas}} - 0.1 \cdot m_{\text{gas}}) \cdot (h_2 - h_3)$$

Para hallar la entalpía h_3 se debe tener constancia que el fluido se encontrará a una presión de 0.06 bar y que es agua saturada con un título de vapor de 0.

$$h_3 := 151.6810^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$Q_2 := (m_{\text{gas}} - 0.02 m_{\text{gas}}) \cdot (h_2 - h_3) = 1.429 \times 10^8 \text{ W}$$

Para hallar de una manera rápida la cantidad de líquido refrigerante necesario, se puede hacer un balance de energía entre el líquido que entra procedente de la torre de refrigeración y el agua que sale condensada que sale del propio condensador.

$$Q_2 = m_{\text{refrig}} \cdot (h_3 - h_5)$$

De h_5 se sabe que está a una temperatura de 10 grados por debajo del líquido que sale condensado. El líquido será también agua pero estará en estado subenfriado.

$$h_{12} := 105.8110^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$m_{\text{refrig}} := \frac{Q_2}{(h_3 - h_{12})} = 3.116 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

➤ BOMBA

Para mover todo el agua condensada, se utilizará una bomba la cual deberá aumentar la presión al impulsar el agua de nuevo al yacimiento. Como cálculo se supone que se necesita una bomba que impulse un caudal equivalente al gas que debe entrar en la turbina.

Se puede deducir que al ser un yacimiento, parte del agua que se impulsa se perderá por grietas (aproximadamente un 25%) y no sirve para producir energía. También que hay una pérdida de presión debido a la fricción del fluido con el yacimiento y la tubería.

Con esto se ha decidido, a parte de ser muy común en geotermia poner una bomba para la inyección de fluido de tipo vertical sumergible

La bomba de inyección se va a considerar que va a elevar la presión 2.1 bar y que no va a aumentar la temperatura del fluido. El rendimiento isentrópico de la bomba será de 0.6 según rendimiento de diseño.

$$m_3 := \frac{m_{\text{gas}} + 0.25 m_{\text{gas}}}{0.3} = 313.384 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Como el título de vapor a la salida del yacimiento es de 0.3 por eso se ha multiplicado por eso se divide entre 0.3, ya que necesitamos una cantidad mínima correspondiente a m_{gas} . Sacando la entalpía de las de las condiciones mencionadas.

Se considera que la bomba introduce el líquido procedente de la piscina en la cual se introducen todos los condensados de la central además de líquido procedente de la torres de refrigeración en caso de que fuese necesario. La temperatura de los condensados, el condensado se introduce a una temperatura de 70 °C y además a 1 atm la temperatura de 70 °C es debida a los condensados calientes mezclado de los del fríos del condensador.

$$h_4 := 293.1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad h_{14} := 293.02 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad \eta_4 := 0.6$$

$$W_4 := \eta_4 \cdot m_3 \cdot (h_4 - h_{14}) = 1.504 \times 10^4 \text{ W}$$

➤ YACIMIENTO

En el balance de energía en el yacimiento geotérmico se tiene en cuenta unas hipótesis de no isocoro, no isobárico y no isoterma.

$$h_5 := 1170.710^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$Q_5 := m_{\text{gas}} \cdot 1.3 (h_5 - h_{14}) = 8.582 \times 10^7 \text{ W}$$

➤ SEPARADOR

El separador ciclónico y el demister se considera que provocan una pérdida de carga de 0.1 bar y además de conseguir separar el gas del vapor para la producción. A efectos de cálculo de balances no se tiene en cuenta.

➤ RENDIMIENTO

Tal como está diseñada esta estimación del ciclo Rankine el rendimiento de Carnot resultante es:

$$\eta_{\text{ciclo}} := \frac{W_1 - W_4}{Q_5} = 0.539$$

Este apartado vienen a demostrar como si el yacimiento geotérmico funcionase pero sin ayudar la caldera de biomasa.

CENTRAL GEOTÉRMICA ESTANDAR A 150 °C

Se consideran los mismos elementos que el yacimiento a 120°C pero entra en funcionamiento la caldera hasta elevar a 150 °C.

➤ TURBINA

POTENCIA ELÉCTRICA	25 MWe
POTENCIA TÉRMICA	46.3 MW
CONSUMO DE GAS	70.6 kg/s
PRESION ENTRADA (EN SATURACIÓN)	5 bar (150 °C)
PRESION SALIDA (EN SATURACIÓN)	0.07 bar (39 °C)

Tabla 7. Resumen de los parámetros más característicos de la turbina (150°C)

➤ CONDENSADOR

POTENCIA TÉRMICA	134.2 MW
CONSUMO DE GAS	63.54 kg/s
PRESION ENTRADA (EN SATURACIÓN)	0.07 bar (39 °C)
PRESION SALIDA (EN SATURACIÓN)	0.06 bar (36.16 °C)
ESTIMACIÓN INICIAL DE REFRIGERANTE	2925 kg/s

Tabla 8. Resumen de los parámetros más característicos del condensador, anexo 1 (150°C)

➤ BOMBA

POTENCIA	0.82 MW
CONSUMO DE LÍQUIDO	294.17 kg/s
PRESION ENTRADA (EN SATURACIÓN)	1 bar (70 °C)
PRESION SALIDA (EN SATURACIÓN)	5 bar (70 °C)

Tabla 9. Resumen de los parámetros más característicos de la bomba (150°C)

➤ YACIMIENTO

POTENCIA TÉRMICA	85.8 MW
-------------------------	---------

Tabla 10. Resumen de los parámetros más característicos del yacimiento (150°C)

➤ CALDERA DE BIOMASA

Aquí simplemente la caldera ayuda a elevar el vapor saturado a 150. Se estima desde la salida del separador de humedad hasta antes de los eyectores y la turbina, por tanto la potencia de la caldera en ese momento sería:

$$h_{\text{caldera}} := h_1 \quad h_{\text{separador}} := 2706.310^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{caldera}} := m_{\text{gas}} \cdot (h_{\text{caldera}} - h_{\text{separador}}) = 2.859 \times 10^6 \text{ W}$$

SEPARADOR

PERDIDA DE CARGA	0.10 bar
FLUIDO GAS SEPARADO	70.60 kg/s
FLUIDO LÍQUIDO SEPARADO	165.7 kg/s

Tabla 11. Resumen de los parámetros más característicos del separador (150°C)



➤ RENDIMIENTO

RENDIMIENTO 0.521

Tabla 12. Rendimiento (150°C)

Es verdad que el rendimiento energético disminuye, pero la exigencia de los demás componentes también, además de conseguir una producción sin fluctuaciones, debido a la ayuda de la caldera de biomasa. Aunque la bomba sube un poco su caudal

CENTRAL GEOTÉRMICA ESTANDAR A 180°C

Se consideran los mismos elementos que el yacimiento a 120°C pero entra en funcionamiento la caldera hasta elevar a 180 °C.

➤ TURBINA

POTENCIA ELÉCTRICA	25 MWe
POTENCIA TÉRMICA	46.3 MW
CONSUMO DE VAPOR	67.36kg/s
PRESION ENTRADA (EN SATURACIÓN)	10 bar (180 °C)
PRESION SALIDA (EN SATURACIÓN)	0.07 bar (39 °C)

Tabla 13. Resumen de los parámetros más característicos de la turbina (180°C)

➤ CONDENSADOR

POTENCIA TÉRMICA	128 MW
CONSUMO DE VAPOR	53.89 kg/s
PRESION ENTRADA (EN SATURACIÓN)	0.07 bar (39 °C)
PRESION SALIDA (EN SATURACIÓN)	0.06 bar (36.16 °C)
ESTIMACIÓN INICIAL DE REFRIGERANTE	2790 kg/s

Tabla 14. Resumen de los parámetros más característicos del condensador, anexo 1 (180°C)

➤ BOMBA

POTENCIA	1.23 MW
CONSUMO DE LÍQUIDO	280.65 kg/s
PRESION ENTRADA (EN SATURACIÓN)	1 bar (70 °C)
PRESION SALIDA (EN SATURACIÓN)	10 bar (70 °C)

Tabla 15. Resumen de los parámetros más característicos de la bomba (180°C)

➤ YACIMIENTO

POTENCIA TÉRMICA 85.8 MW

Tabla 16. Resumen de los parámetros más característicos del yacimiento (180°C)

➤ CALDERA DE BIOMASA

POTENCIA TÉRMICA 4.86 MW

Tabla 17. Resumen de los parámetros más característicos de la caldera de Biomasa (180°C)



➤ SEPARADOR

PERDIDA DE CARGA	0.10 bar
FLUIDO VAPOR SEPARADO	67.36 kg/s
FLUIDO LÍQUIDO SEPARADO	157.17 kg/s

Tabla 18. Resumen de los parámetros más característicos del separador (180°C)

➤ RENDIMIENTO

RENDIMIENTO	0.509
--------------------	-------

Tabla 19. Rendimiento (180°C)

ANEXO 2 (CÁLCULOS DEL CONDENSADOR BAROMÉTRICO)

En una central geotérmica es vital tener un condensador, ya que permita cambiar de fase el fluido y así volver a inyectar el fluido en el yacimiento geotérmico.

Como se ve a la hora de seleccionar el condensador, Se ha optado que el mejor para una central geotérmica es un condensador barométrico de contacto directo.

Con el contacto directo lo que conseguimos es aumentar el área de transferencia de calor. Debido que al pulveriza el agua en los sprays aumentamos el área que envolverá el vapor que viene de la turbina. Además se tiene la ventaja de un cambio de fase lo cual aumenta el coeficiente de convección de transferencia de calor.

En una central geotérmica es interesante la teoría del contacto directo ya que si se utilizasen empaquetadores o bandejas reduce el área de transferencia. El condensador en concreto seguiría este esquema (en lo referente a la vasija):

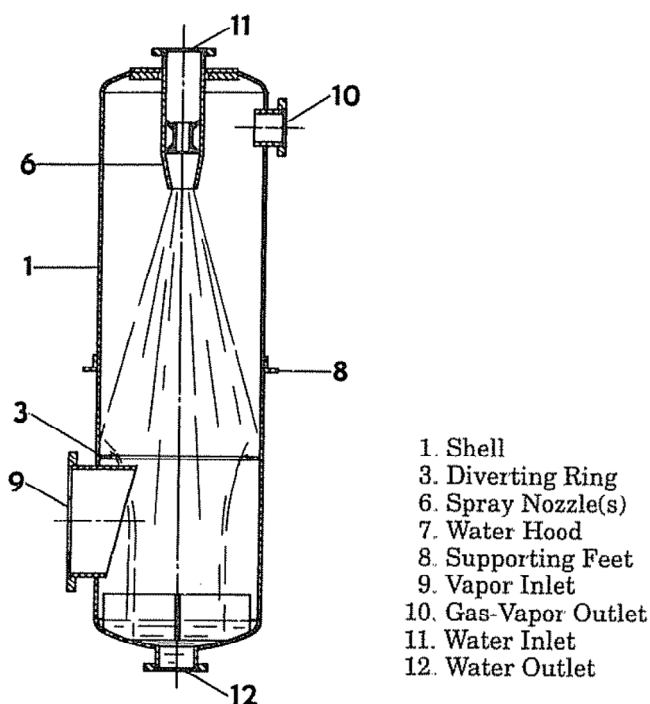


Figura 73. Condensador de contacto directo contracorriente tipo Spray [5]

Según las teorías de Jacobs en 1985 para poder diseñar un condensador de tipo barométrico es de vital importancia determinar en primer lugar la altura de la vasija necesaria para poder obtener la ΔT requerida, además de de la cantidad de agua requerida para poder condensar el fluido portador del ciclo.

Según este proceder y la norma del "Heat Exchange Institute" sobre condensadores de bajo nivel y barométricos de contacto directo, se calcula las

necesidades de agua para poder condensar el vapor que viene de la turbina además de las medidas principales de tamaño del condensador.

El funcionamiento de los condensadores de contacto directo está basado en estudios teóricos, correlaciones experimentales y de la combinación de los dos. La precisión de los cálculos es limitada por el tipo de los muros de la vasija (transferencia de calor), el grosor del recipiente y la variabilidad de su geometría, la cuales se simplifica para estas teorías.

Las hipótesis que se tienen en cuenta son: El espectro de la gota y la velocidad producida en el chorro puede ser representada como una partícula esférica en tamaño. Normalmente los fabricantes de los aspersores provisionan de datos estadísticos del tamaño de las gota estimado y la frecuencia de la misma. A la hora de seleccionar un tamaño de gota se debe poner la peor situación, es decir el tamaño de gota más grande.

La velocidad del vapor puede despreciarse en relación con la velocidad de la gota. Esta suposición es válida para gotas inyectadas en spray, pero no para gotas que caen por gravedad.

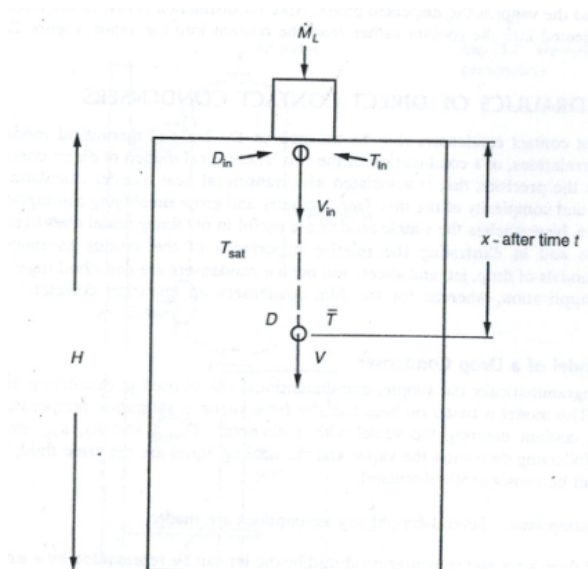
La transferencia de calor a la caída de la gota se determina como un líquido en conducción transitoria, es decir, se considera que las resistencias térmicas interfaciales y las del lado del gas son insignificantes. Esto se explica ya que el coeficiente de transferencia interfacial (según Sideman and Moalem-Marón) entre el vapor y el agua en condiciones de presión atmosférica es de $7.86 \times 10^6 \text{ W/(K} \cdot \text{m}^2)$, que es un valor mucho mayor que coeficiente de transferencia del condensador en general, que es del orden de $10^3 \text{ W/(K} \cdot \text{m}^2)$. La transferencia de calor del lado del vapor depende del tamaño y de la velocidad de la gota en relación con el vapor. Pudiendo ser lo suficientemente pequeño para invalidar este supuesto, si particularmente hay gases incondensables presentes.

Se considera la gota en una conducción transitoria, por lo que se puede calcular suponiendo que la temperatura superficial llega a ser igual a T_{sat} en el instante en el que entra en el recipiente y se pone en contacto con el vapor. Esta suposición es estrictamente cierta cuando el número de Jacob es muy grande, por ejemplo, mayor de 20 para la condensación de vapor en gotas de agua.

La gota en la conducción transitoria se calcula considerándola como una esfera sólida, es decir, los efectos de las circulaciones internas se desprecian.

El incremento del tamaño de la gota en la condensación se considera despreciable en los cálculos referentes a la transferencia de calor, de hecho se considera que el diámetro de la gota a la entrada en el condensador es constante e igual que el de entrada. Esta suposición es razonable para aplicaciones ya que el diámetro aumenta usualmente menos de un 3%.

- VELOCIDAD DE CAÍDA Y DESPLAZAMIENTO



Representación de una gota en un condensador de tipo spray

La ecuación general del movimiento de una gota esférica, de volumen V y diámetro D , un movimiento relativo respecto la circulación del vapor. Siendo su velocidad V .

$$\underbrace{\rho_L \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \frac{dV}{dt}}_{\text{Fuerza para acelerar la gota}} = \underbrace{\frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot (\rho_L - \rho_G) \cdot g}_{\text{Fuerza debida a la gravedad}} - \underbrace{C_D \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\rho_G \cdot V^2}{2}}_{\text{Fuerza de arrastre}}$$

La densidad del líquido será ρ_L y la densidad del gas se expresa como ρ_G . El término C_D representa el coeficiente de fuerza de arrastre de la gota. Es decir, expresa la facilidad con que un fluido pasa a través de un cuerpo.

El primer término de la ecuación representa fuerza requerida para acelerar una gota en el vacío. El segundo término muestra la fuerza debida a la aceleración de la gravedad. El tercer y último término enseña la fuerza de arrastre.

El medio para introducir el agua en el condensador es por rociadores, como la velocidad a la entrada es alta (respecto al gas que cuando entra en el condensador reduce drásticamente su velocidad) y el termino de la fuerza de la gravedad es despreciable queda la ecuación de la siguiente forma:

$$\underbrace{\rho_L \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \frac{dV}{dt}}_{\text{Fuerza para acelerar la gota}} = \underbrace{\frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot (\rho_L - \rho_G) \cdot g}_{\text{Fuerza debida a la gravedad}} - \underbrace{C_D \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\rho_G \cdot V^2}{2}}_{\text{Fuerza de arrastre}} \rightarrow$$

$$\frac{dV}{dt} = -C_D \cdot \frac{3}{4 \cdot D} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_L} \cdot V^2$$

Otra forma de expresar el C_D es a través del número de Reynolds

$$Re_D = \frac{V \cdot D \cdot \rho_G}{\eta_G} = \frac{V \cdot D}{\nu_G}$$

Siendo el C_D sacado de la correlación de Butterworth, cumpliendo que el Re_D este entre 6 y 400.[1]

$$C_D \approx 27 \cdot Re_D^{-0.84}$$

Si combinamos esta ecuaciones y la introducimos en la ecuación del movimiento de la gota esférica:

$$\frac{dV}{dt} = -27 \cdot \left(\frac{V \cdot D}{\nu_G} \right)^{-0.84} \cdot \frac{3}{4 \cdot D} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_L} \cdot V^2 \rightarrow$$

$$\frac{dV}{dt} = -20.25 \cdot \frac{V^{1.16} \cdot \nu_G^{0.84}}{D^{1.84}} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_L} \rightarrow$$

Si se resuelve la ecuación diferencial, teniendo en cuenta que:

$$\Gamma = \frac{\rho_G}{\rho_L} \cdot \nu_G^{0.84}$$

Entonces:

$$\int_{V_{inicial}}^{V_{final}} \frac{dV}{V^{1.16}} = -20.25 \cdot \frac{\Gamma}{D^{1.84}} \cdot \int_0^t dt$$

Cuya resolución es:

$$V_{final}^{-0.16} - V_{inicial}^{-0.16} = \frac{-20.25 \cdot \Gamma \cdot t}{D^{1.84}} \cdot (-0.16)$$

Si se reordena expresa la velocidad final a la que estará la gota cuando haya conseguido transferir el calor del vapor a la gota.

$$V_{final}^{-0.16} = V_{inicial}^{-0.16} + 3.23 \cdot \frac{\Gamma \cdot t}{D^{1.84}}$$

Pero lo que nos interesa es dar un valor de distancia necesaria para poder haber transferido el calor que deseamos. Para eso sabemos que la $V=dx/dt$ lo cual lo introducimos en la ecuación y resolverlo como hemos hecho anteriormente es:

$$x = 0.06 \cdot \frac{D^{1.84}}{\Gamma} \cdot (V_{inicial}^{0.84} - V_{final}^{0.84})$$

- TRASFERENCIA DE CALOR EN LA GOTA

Los rociadores expulsan gotas al condensador, entrando a una temperatura inicial, $T_{entrada}$. Inmediatamente después, la superficie externa de las gotas asumen la temperatura de saturación del vapor, al que están expuestas.

El calor al difundirse dentro de la gota a una velocidad controlada por la difusión térmica del líquido, como resultado la temperatura media de la gota aumenta.

Para obtener la temperatura media a la que está sometido el condensador se utiliza la correlación de Pasamehmetoglu and Nelson :

$$\vartheta = \frac{T_{media} - T_{entrada}}{T_{sat} - T_{entrada}} = \left[1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot K_L \cdot t}{D_{gota}^2}\right) \right]^{1/2}$$

El coeficiente de difusión térmica $K_L = \frac{\lambda_L}{c_{pL} \cdot \rho_L}$ y el número de Fourier es $F_0 = \frac{K_L \cdot t}{R^2}$

Por tanto, si se desarrolla la correlación de Pasamehmetoglu and Nelson primero con la ecuación de Fourier:

$$\vartheta = \frac{T_{media} - T_{entrada}}{T_{sat} - T_{entrada}} = [1 - \exp(\pi^2 \cdot F_0)]^{1/2}$$

El término de ϑ es una medida de la utilización de agua de refrigeración en un tiempo, t . Representa la relación entre el calor eliminado del vapor y el máximo calor posible que se podría eliminar.

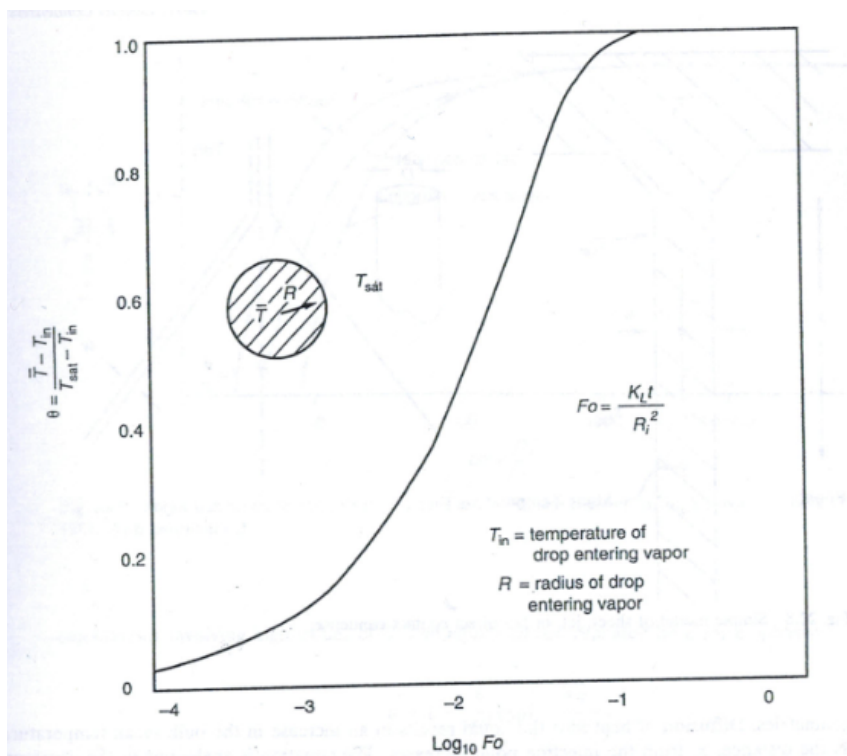
Para determinar el calor de transmisión en el calor nos servimos del balance de calor de un condensador.

$$\dot{Q} = \dot{M}_L \cdot c_{pL} \cdot (\bar{T} - T_{entrada})$$

Si como se explico antes, el máximo calor posible de extraer sería $(T_{sat} - T_{entrada})$ y es multiplicado por el porcentaje de calor que de verdad se puede extraer, teniendo:

$$\dot{Q} = \dot{M}_L \cdot c_{pL} \cdot \theta \cdot (T_{sat} - T_{entrada})$$

Entonces para poder obtener los términos del número de Fourier y θ se usa la siguiente gráfica:



Gráfica 23. Representación para sacar el número de Fourier [1]

CÁLCULO DEL CONDENSADOR PARA UN FLUIDO GEOTÉRMICO A 120°C

Teniendo estos conceptos claros se obtiene las medidas de altura del cuerpo del condensador y además la cantidad de masa líquida.

Primero se parte de los datos del gas a la entrada del condensador, teniendo en cuenta que parte del flujo másico que entra en el condensador ya está líquido, por tanto:

$$x_2 := 0.8 \quad m_2 := 65.153 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{2v} := m_2 \cdot x_2 = 52.122 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{2l} := m_2 \cdot (1 - x_2) = 13.031 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Con lo que se necesita menos potencia térmica para poder condensar el vapor.

A la salida de la turbina se tiene un vapor saturado con las siguientes propiedades:



$$v_{2g} := 20.532 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$P_{2g} := 0.07 \cdot \text{bar}$$

$$\rho_{2g} := \frac{1}{v_{2g}} = 0.049 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Los coeficientes del vapor se sacan de la tabla 31[17]. por interpolación lineal.

$$T_{2g} := 39.044^\circ\text{C} = 312.194\text{K}$$

$$T_{2g_sig_aux} := 315\text{K} \quad cp_{2g_sig_aux} := 1.88810^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_{2g_ant_aux} := 310\text{K} \quad cp_{2g_ant_aux} := 1.88210^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$cp_{2g} := \frac{(T_{2g} - T_{2g_ant_aux})}{(T_{2g_sig_aux} - T_{2g_ant_aux})} \cdot (cp_{2g_sig_aux} - cp_{2g_ant_aux}) + cp_{2g_ant_aux} = 1.885 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2}$$

$$\eta_{2g_sig_aux} := 9.6910^{-6} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

$$\eta_{2g_ant_aux} := 9.4910^{-6} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

$$\eta_{2g} := \frac{(T_{2g} - T_{2g_ant_aux})}{(T_{2g_sig_aux} - T_{2g_ant_aux})} \cdot (\eta_{2g_sig_aux} - \eta_{2g_ant_aux}) + \eta_{2g_ant_aux} = 9.578 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$v_{2g} := \frac{\eta_{2g}}{\rho_{2g}} = 1.967 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$h_{Lg2_sig_aux} := 240210^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$h_{Lg2_ant_aux} := 241410^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$h_{Lg2} := \frac{(T_{2g} - T_{2g_ant_aux})}{(T_{2g_sig_aux} - T_{2g_ant_aux})} \cdot (h_{Lg2_sig_aux} - h_{Lg2_ant_aux}) + h_{Lg2_ant_aux} = 2.409 \times 10^6 \frac{m^2}{s^2}$$

$$P_{2g} = 7 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$T_{sat_vapor} := T_{2g} = 312.194K$$

Los datos del agua líquida que se introduce para condensar el vapor serán siguiendo la condiciones de diseño del condensador barométrico por lo cual la temperatura a la entrada de agua refrigerante (T_{12}) debe ser entre 10-15 grados. Se utiliza la tabla de cálculo de agua líquida.

$$T_{12} := T_{sat_vapor} - 10K = 302.194K$$

$$T_{2l_sig_aux} := 30^\circ C \quad \rho_{2l_sig_aux} := 996.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$T_{2l_ant_aux} := 25^\circ C \quad \rho_{2l_ant_aux} := 997.9 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{2l} := \frac{(T_{12} - T_{2l_ant_aux})}{(T_{2l_sig_aux} - T_{2l_ant_aux})} \cdot (\rho_{2l_sig_aux} - \rho_{2l_ant_aux}) + \rho_{2l_ant_aux} = 996.525 \frac{kg}{m^3}$$

$$\lambda_{2l_sig_aux} := 616 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_{2l_ant_aux} := 608 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_{2l} := \frac{(T_{12} - T_{2l_ant_aux})}{(T_{2l_sig_aux} - T_{2l_ant_aux})} \cdot (\lambda_{2l_sig_aux} - \lambda_{2l_ant_aux}) + \lambda_{2l_ant_aux} = 0.614 \frac{m \cdot kg}{K \cdot s^3}$$

$$cp_{2l_sig_aux} := 4.175 \cdot 10^3 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

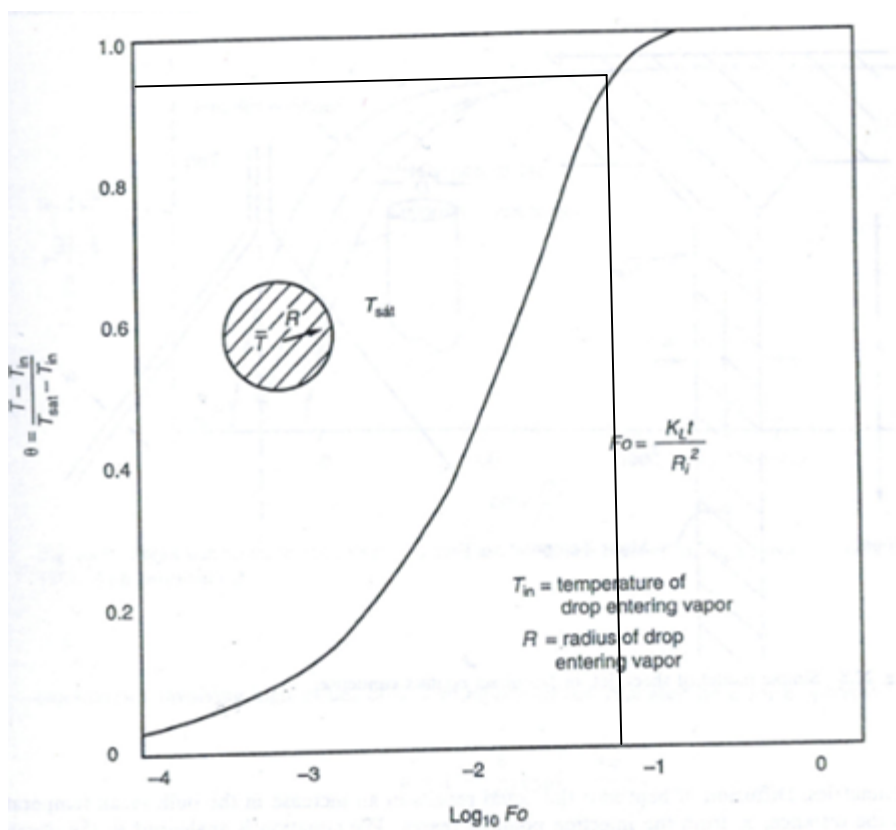
$$cp_{2l_ant_aux} := 4.176 \cdot 10^3 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$cp_{2l} := \frac{(T_{12} - T_{2l_ant_aux})}{(T_{2l_sig_aux} - T_{2l_ant_aux})} \cdot (cp_{2l_sig_aux} - cp_{2l_ant_aux}) + cp_{2l_ant_aux} = 4.175 \times 10^3 \frac{m^2}{K \cdot s^2}$$

Se calcula el tiempo de residencia necesario para poder transferir todo el calor que se necesita

$$K_L := \frac{\lambda_{2l}}{\rho_{2l} \cdot c_{p2l}} = 1.477 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Ayudados de la gráfica apara hallar el número de Fourier



Gráfica 24. Utilización de representación para sacar el número de Fourier [1]

Según las especificaciones de nuestro condensador barométrico y de los aprovechamientos normales de agua de refrigeración en la vasija del condensador del $\theta = 95\%$, que como vemos en la gráfica corresponde a un número de Fourier de 0,25.

Además se suponen gotas de 2 mm de diámetro saliendo de los rociadores según catálogos de Leichter, Koerting, GEA. Se elige el diámetro de gota más grande, porque da la peor situación:

$$D_{\text{gota}} := 2\text{mm}$$

$$R_{\text{gota}} := \frac{D_{\text{gota}}}{2} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Con el número de Fourier, K_L y R_{gota}

$$t := \frac{F_O \cdot R_{\text{gota}}^2}{K_L} = 1.70 \text{ ls}$$

Ahora comprobando que el Reynolds este entre 6 y 400 para cumplir la ecuación de Butterworth. Para eso suponemos que disponemos de una velocidad de impulsión en los rociadores de 3 m/s, que según las norma HEI [5] (normas de condensadores barométricos de contacto directo y condensadores de bajo nivel) aportado 5, tabla 4. Es una velocidad recomendable de impulsión para aprovechar la transferencia de calor.

$$v_{\text{entrada_gota}} := 3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re_{\text{entrada}} := \frac{v_{\text{entrada_gota}} \cdot D_{\text{gota}}}{\nu_{2g}} = 30.511$$

Como es visible entra dentro del rango de valores para utilizar esta correlación.

El siguiente paso es calcular la velocidad que llega alcanzar la gota hasta la finalización del recorrido.

Sacando antes el parámetro auxiliar:

$$\tau := v_{2g}^{0.84} \cdot \frac{\rho_{2g}}{\rho_{2l}} = 3.765 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^{1.68}}{\text{s}^{0.84}}$$

Se calcula la velocidad final de la gota:

$$v_{\text{final_gota}} := \left(v_{\text{entrada_gota}}^{-0.16} + 3.23 \frac{\tau \cdot t}{D_{\text{gota}}^{1.84}} \right)^{\frac{1}{-0.16}} = 2.606 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A partir de las velocidades entrada y de salida de la gota ya se puede hallar el espacio necesario para que se transfiera el calor, y además eso nos da la altura del cuerpo del condensador.

$$H_{\text{cuerpo_condensador}} := 0.06 \frac{D_{\text{gota}}^{1.84}}{\tau} \left(v_{\text{entrada_gota}}^{0.84} - v_{\text{final_gota}}^{0.84} \right) = 4.841 \text{ m}$$

Ahora a partir del balance de energía del condensador, podremos obtener la cantidad de masa líquida para condensar el vapor. Dado que se potencia térmica la diferencia de temperaturas y además los datos capacidad calorífica a presión cte. El dato de la potencia calorífica se saca de la central con fluido geotérmico de 120 °C

$$Q_{23} := 145.8 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$M_{L_necesario} := \frac{Q_{23}}{\theta \cdot c_{p21} (T_{\text{sat_vapor}} - T_{12})} = 3.676 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- ENTRADA DE VAPOR

Para calcular el diámetro que ocupa el cuerpo del condensador, se debe prestar atención a el caudal de aire que va a salir de la turbina.

Para hallar la velocidad a la que entra el vapor, nos servimos de la norma HEI (condensadores de contacto directo y condensadores de bajo nivel). Ya que nos ayuda a determinar la velocidad recomendada de vapor saturado en este tipo de condensadores.

$$m_{2v} = 52.122 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{suct_sig_aux}} := 3 \text{ in_Hg} = 1.016 \times 10^4 \text{ Pa} \quad V_{\text{suct_sig_aux}} := 300 \frac{\text{ft}}{\text{s}} = 91.44 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{suct_ant_aux}} := 2 \text{ in_Hg} = 6.773 \times 10^3 \text{ Pa} \quad V_{\text{suct_ant_aux}} := 370 \frac{\text{ft}}{\text{s}} = 112.776 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_{\text{entra_gas}} := 370 \frac{\text{ft}}{\text{s}} = 112.776 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ahora se calcula el área que ocupa atrás de la Fórmula de flujo másico:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \rho_G \cdot v_{\text{entra_gas}} \cdot A_{\text{gas_tub}}$$

$$A_{\text{tub_gas}} := \frac{m_{2v}}{\rho_{2g} \cdot V_{\text{entra_gas}}} = 9.489 \text{ m}^2 \quad D_{\text{entra_gas}} := \left(\frac{4 \cdot A_{\text{tub_gas}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 3.476 \text{ m}$$

- SALIDA DE INCONDENSABLES

Para la tubería de salida de vapor de los eyectores depende de la velocidad, de salida, aunque interesa el diámetro de la boca del eyector tenemos aproximadamente una velocidad de 15 m/s (tabla 31 [17]) y para saber el tamaño de salida, se necesita saber cuánto absorbe el eyector calculado. Todo del primer eyector. Aproximamos al volumen específico del aire ya que el vapor de agua en comparación es despreciable.

$$A_{\text{eyector1}} := \frac{1.578 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\frac{1}{0.833 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \cdot 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.088 \text{m}^2$$

$$D_{\text{tub_eyector1}} := \left(\frac{4 \cdot A_{\text{eyector1}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.334 \text{m}$$

- ENTRADA DE AGUA DE REFRIGERACIÓN

En función del caudal que se necesita:

$$M_{L_necesario} = \rho_L \cdot v_{\text{entrada_gota}} \cdot A_r$$

$$Q_{\text{refrige}} = v_{\text{entrada_gota}} \cdot A_r$$

$$A_r := \frac{M_{L_necesario}}{(\rho_L \cdot v_{\text{entrada_gota}})} = 1.23 \text{m}^2$$

$$Q_{\text{refrige}} := v_{\text{entrada_gota}} \cdot A_r = 3.689 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$D := \left(\frac{4 \cdot A_r}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.251 \text{m}$$

Este es el diámetro de la tubería que conduce el caudal a la torre de refrigeración.

- ALTURA Y DIÁMETRO DE LA PIERNA BAROMÉTRICA

En la pierna barométrica el agua caerá por gravedad, la altura recomendable para que baje el agua y se siga manteniendo el vacío es de entre 0.5 m/s y 3 m/s. Según las especificaciones ya que a mayores velocidades se generan grandes pérdidas de carga [6]

$$\Delta P_{BC_HW} := 0.06 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = -9.4 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$h_{\text{pierna_BC}} := 9.2 \text{ m}$$

Como la ecuación de Bernuilli plantea

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Considerando la altura hasta la piscina de condensados.

$$T_{BC} := T_{\text{sat_vapor}} - 3 \cdot K = 309.194 \text{ K}$$

$$\rho_{BC} := 993.69 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{BC} := \sqrt{\frac{-\Delta P_{BC_HW} - \rho_{BC} \cdot g \cdot h_{\text{pierna_BC}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{BC}}} = 2.958 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El caudal por tanto es:

$$Q_{BC} := \frac{M_{L_necesario} + m_{2v}}{\rho_{BC}} = 3.752 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con lo que el diámetro de la tubería será:

$$A_{bc} := \frac{Q_{BC}}{v_{BC}} = 1.268 \text{ m}^2$$

$$D_{BC} := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{bc}}{\pi}} = 1.271 \text{ m}$$

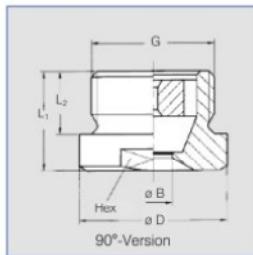
- ROCIADORES Y DIÁMETRO DEL CONDENSADOR

El modelo utilizado es un "cone nozzles" de la serie 403 de Lechler, l cual lleva el agua de 1 bar en la torre de refrigeración a él condensador a 0,07 bar, que para esa especificación expulsa 947 l/min. Como ocupa 118 mm se repartirán hasta que llenen el condensador. No se tiene en cuenta los estudios de el área abarcada por

el rociador, ya que difieren debido a las corriente de salida de incondensables. Eso sería otro estudio.

Very uniform spray pattern.

Applications:
Surface spraying, spraying
over packings, chemical
process engineering, cooling
of gaseous fluids and solids.

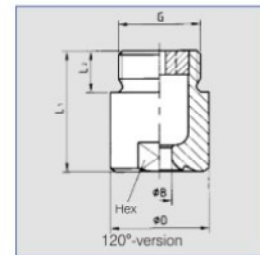


90°-version

Type	BSPP	Dimensions [mm]			
		L ₁	L ₂	D	Hex
403.446/403.486	2 1/2"	52	27	83	75
403.526	3"	60	30	98	85
403.606	3 1/2"	70	32	118	105

120°-version

Type	BSPP	Dimensions [mm]			
		L ₁	L ₂	D	Hex
403.448/403.488	2 1/2"	124	27	83	75
403.528	3"	153	30	98	85
403.568/403.608	3 1/2"	156	32	118	105
403.628	4"	165	36	128	110




Spray angle	Ordering no.		B Ø [mm]	E Ø [mm]	V̇ [l/min]								Spray diameter D at p=2 bar 	
	Type	Mat.-no. 05 Grey cast iron 1.4571/316SS 17			p [bar]									
					0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	H = 0,5 m	H = 1 m	
90°	403. 446	- ●	25,00	12,00	187	230	303	400	470	577	660	900	1700	
	403. 486	- ●	29,50	12,00	234	287	379	500	588	721	825	900	1700	
	403. 526	- ●	32,00	13,80	295	362	477	630	741	909	1040	900	1700	
	403. 606	- ●	40,00	15,00	468	574	758	1000	1176	1443	1651	980	1750	
120°	403. 448	● ●	25,50	10,00	187	230	303	400	470	577	660	1500	2850	
	403. 488	● ●	29,50	11,00	234	287	379	500	588	721	825	1500	2850	
	403. 528	● ●	32,00	15,00	295	362	477	630	741	909	1040	1500	2850	
	403. 568	● ●	38,00	12,00	375	459	606	800	941	1154	1320	1500	2850	
	403. 608	- ●	42,00	12,00	469	574	759	1000	1176	1443	1651	1500	2850	
	403. 628	- ●	45,00	15,00	585	718	947	1250	1470	1903	2063	1600	2900	

Figura 74. Hoja de catálogo de Leichler [36]

Se selecciono este rociador debido a su gran caudal

$$Q_{\text{rociador}} := 947 \frac{1}{\text{min}} = 0.016 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Por lo que el número de rociadores necesario:

$$n_{\text{rocia}} := \frac{Q_{\text{refrige}}}{Q_{\text{rociador}}} = 233.706 \text{ Aprox}=234$$

Debido al tamaño de los rociadores y por la configuración determinada se estima que el diámetro del condensador sería de 4,01 m.

Para el dimensionado se ha tomado el siguiente criterio

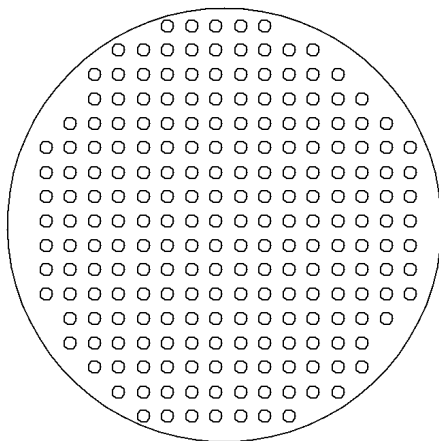


Figura 75. Disposición aproximada de rociadores según distribución

Para el cálculo del condensador a diferentes condiciones el fluido, influye en los caudales y por tanto en el tamaño de las salidas y entrada de vapor, condensado e incondensables. Pero no varían las presiones y temperaturas de diseño

CÁLCULO DEL CONDENSADOR PARA UN FLUIDO GEOTÉRMICO A 150°C

- CONDENSADOR

POTENCIA TÉRMICA	134.2 MW
CANTIDAD DE VAPOR A CONDENSAR	49.42 kg/s
NECESIDAD DE REFRIGERANTE	3383 kg/s
ALTURA CONDENSADOR	4.84 m
SECCIÓN ENTRADA DE VAPOR	3,38 m
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE	1.2 m
SECCIÓN SALIDA INCONDENSABLES	0.32 m
SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA	1.22 m
ALTURA PIERNA BAROMÉTRICA	9.20 m
NÚMERO DE ROCIADORES	216
DIÁMETRO DEL CONDENSADOR	3.7 m

Tabla 20. Resumen de los parámetros más característicos del condensador barométrico de contacto directo de tipo spray, anexo 2 (150°C)

CÁLCULO DEL CONDENSADOR PARA UN FLUIDO GEOTÉRMICO A 180°C

- CONDENSADOR

POTENCIA TÉRMICA	128 MW
CANTIDAD DE VAPOR A CONDENSAR	48.15kg/s
NECESIDAD DE REFRIGERANTE	3227 kg/s
ALTURA CONDENSADOR	4.84 m



SECCIÓN ENTRADA DE VAPOR	3.34 m
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE	1.17 m
SECCIÓN SALIDA INCONDENSABLES	0.32 m
SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA	1.19 m
ALTURA PIERNA BAROMÉTRICA	9.20 m
NÚMERO DE ROCIADORES	206
DIÁMETRO DEL CONDENSADOR	3.6 m

Tabla 21. Resumen de los parámetros más característicos del condensador barométrico de contacto directo de tipo spray, anexo 2 (180°C)

ANEXO 3 (CÁLCULO DE LOS INTERCONDENSADORES)

El cálculo de los intercondensadores, se procede de igual forma, lo único que cambia, son las condiciones de vacío. Como no se va introducir para un estudio de sensibilidad, sólo se dimensiona para las condiciones de operación de 120°C. Sin embargo si que se introducen el datos de la presión de funcionamiento. Las condiciones de funcionamiento de los intercondensadores vienen determinadas de las hipótesis de presiones de los eyectores.

- INTERCONDENSADOR 1

PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO (SATURADO)	0.33 bar (71 °C)
PORCENTAJE DE INCONDENSABLES	2 %
POTENCIA TÉRMICA	30.11 MW
CANTIDAD DE VAPOR A CONDENSAR	1.578 kg/s
NECESIDAD DE REFRIGERANTE	76.03 kg/s
ALTURA CONDENSADOR	3.63 m
SECCIÓN ENTRADA DE VAPOR	0.32 m
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE	0.2 m
SECCIÓN SALIDA INCONDENSABLES	0.207 m
SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA	0.183 m
ALTURA PIERNA BAROMÉTRICA	9.2 m
NÚMERO DE ROCIADORES	5
DIÁMETRO DEL CONDENSADOR	0.6 m

Tabla 22. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 1 (120°C)

El diámetro mínimo en caso de que el diámetro de todos los rociadores no alcance 0.6m, entonces es 0.6 m.

- INTERCONDENSADOR 2

PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO (SATURADO)	1.05 bar (101°C)
PORCENTAJE DE INCONDENSABLES	2 %
POTENCIA TÉRMICA	10.19 MW
CANTIDAD DE VAPOR A CONDENSAR	0.577 kg/s
NECESIDAD DE REFRIGERANTE	25.778 kg/s
ALTURA CONDENSADOR	3.63 m
SECCIÓN ENTRADA DE VAPOR	0.11 m
SECCIÓN ENTRADA DE REFRIGERANTE	0.13 m
SECCIÓN SALIDA INCONDENSABLES	0.03m
SECCIÓN PIERNA BAROMÉTRICA	0.11 m
ALTURA PIERNA BAROMÉTRICA	9.2 m
NÚMERO DE ROCIADORES	2
DIÁMETRO DEL CONDENSADOR	0.6 m

Tabla 23. Resumen de los parámetros más característicos del intercondensador 2 (120°C)

El diámetro mínimo en caso de que el diámetro de todos los rociadores no alcance 0.6m, entonces es 0.6 m.

Cada intercondensador supone una pérdida de carga de 0.01 bar.

ANEXO 4 (CÁLCULO DE EYECTORES DE VAPOR)

Se procede a dimensionar los eyectores según varios tipos de funcionamiento 120°C, 150°C y 180 °C. Se expone la teoría de cálculo para 120°C y para los demás se colocan tablas de tamaños.

CÁLCULO DEL EYECTORES PARA UN FLUIDO GEOTÉRMICO A 120°C

Según la presión que queramos tener en el condensador , necesitaremos más o menos eyectores de vapor.

PRESIÓN DE OPERACIÓN	NÚMERO DE ETAPAS
60- 750 mm Hg	1 etapa
10-100 mm Hg	Dos etapas
2-15 mm Hg	Tres etapas
0.025-2.5 mm Hg	Cuatro etapas
0.004-0.05 mm Hg	Cinco etapas

Tabla 24. Extracto de [6] para determinar el número de etapas de eyectores

Como la presión de succión será la del condensador, la considerada en el condensador, se supone que es de 0,07 bar que son 52,5 mmHg , por tanto son necesario 2 etapas, con dos intercondensadores. La función principal de estos cálculos es hallar el volumen necesario de aire para poder condensar el vapor de agua que salga del condensador barométrico con los incondensables.

Según los datos del condensador y del agua que circula procedente de la torre de refrigeración se estima que la presión de trabajo es:

$$P_{\text{condensador}} = 0.07 \text{ bar}$$

$$P_3 := 0.07 \text{ bar} = 7 \times 10^3 \text{ Pa}$$

La temperatura de diseño de los condensadores es:

$$T_3 := 39.044^\circ\text{C}$$

Entonces la temperatura del agua de entrada procedente de la torre de refrigeración deberá ser entre 11 y 15 °C (según HEI)

$$T_{12} := T_3 - 10\text{K} = 302.194\text{K}$$

Entonces según las consideraciones de diseño de un eyector de vapor se considera que deberá trabajar a una temperatura de diseño 3 grados por debajo del líquido de refrigeración. A la entrada del vapor arrastrado de condensador.

$$T_{\text{diseño}} := T_{12} - 3 \cdot \text{K} = 299.194\text{K}$$



Según el HEI se estima que la temperatura deberá ser un máximo de 2°C por encima de la temperatura de entrada del refrigerante.

$$T_{11} := T_{12} + 2 \cdot K = 304.194K$$

Asumiendo que la pérdida de presión en el condensador barométrico será de 0.01 bar, se supone que la presión de succión del eyector será de 0.06 bar.

Como otro dato de partida se debe conocer el peso molecular del vapor de agua y los no condensables.

$$PM_{H_2O} := 18$$

$$PM_{nc} := 43.4$$

Para mantener el vacío dentro del condensador se debe calcular tanto las características de los eyectores, como el flujo de vapor necesario para comprimir y extraer los gases incondensables.

Ahora según las tablas del HEI se determina la cantidad de flujo de vapor necesario para comprimir y condensar el vapor que quede a la salida del condensador barométrico.

Entonces en primer lugar se determina la cantidad de vapor de agua que contendría el gas a la salida del condensador barométrico.

$$M_{mv} = \frac{P_{vH_2O}}{P_{op} - P_{vH_2O}} \cdot \frac{M_{nc} \cdot 18}{PM_{nc}}$$

Como se visualiza para eso hay que saber la presión en el eyector del fluido de succión, además de la presión de vapor.

Además en realidad no sabe con exactitud la masa de no incondensables, pero si sabemos que será e 2% de la masa total de gas que entre en el condensador. Ya que suele ser un dato que nos proporciona .

Entonces a partir de la masa de entrada en el yacimiento y de la cantidad de agua distinguida en el separador ciclónico y el separador de humedad.

$$m_6 := 313.84 \frac{kg}{s} \quad x_{titulo_vapor} := 0.3$$

$$m_7 := x_{titulo_vapor} \cdot m_6 = 94.152 \frac{kg}{s}$$



Para calcular los eyectores de vapor, se consideran las siguientes hipótesis pasos para calcular:

El vapor y los gases incondensables se considerados por separado. El error de cálculo por tratarlo de manera separa es minúsculo. Del vapor de agua se tiene claro cuáles son sus constituyentes y cuál es su peso molecular. En el caso de los gases incondensables aunque se pueden saber cuáles son sus constituyentes, por lo general se estiman los cálculos con el gas que tenga más peso en la composición. En este caso se sabe cuál es el peso molecular de los gases incondensables.

- El siguiente paso es encontrar la relación de arrastre para los gases incondensables y el vapor de agua. Es decir, el peso equivalente (DAE) del vapor de agua y de los incondensables absorbido por el eyector de vapor. En el peso del vapor respecto del aire (elemento más predominante de los no incondensables) y en función de la temperatura a la que se encuentra el eyector de vapor.
- A continuación se suma el equivalente total del vapor de agua y de los gases incondensables.
- Se procede a hallar la relación de compresión entre la presión de succión y la presión de descarga en cada etapa.
- Después se halla la relación de expansión del flujo, es decir, el ratio entre la presión del vapor motriz (el vapor utilizado para extraer los incondensables) y la presión de succión.
- A partir de los datos obtenidos podemos hallar la cantidad flujo motriz necesario para extraer los incondensables y poder condensar el mayor contenido de vapor de agua.
- Mediante la ley de Dalton, como ya se la presión de vapor dentro del eyector procedo hallar la cantidad de vapor que es succionado.

EYECTOR 1

El rendimiento de un condensador no es el 100%, por tanto, además de gases no incondensables, los eyectores arrastrarán vapor de agua. Por eso se estima la cantidad de vapor aspirado del condensador barométrico.

$$M_{nc} := m_7 \cdot 0.02 = 0.587 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{vH_2O} := 35.08$$

está en mm Hg
corresponde con la
temperatura de
saturación a 29 °C

$$M_{nc_aux} := \frac{M_{nc}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \cdot 3600 = 2.112 \times 10^3$$

$$P_{op} := 52.5 - 7.5 = 45$$

está en mm Hg

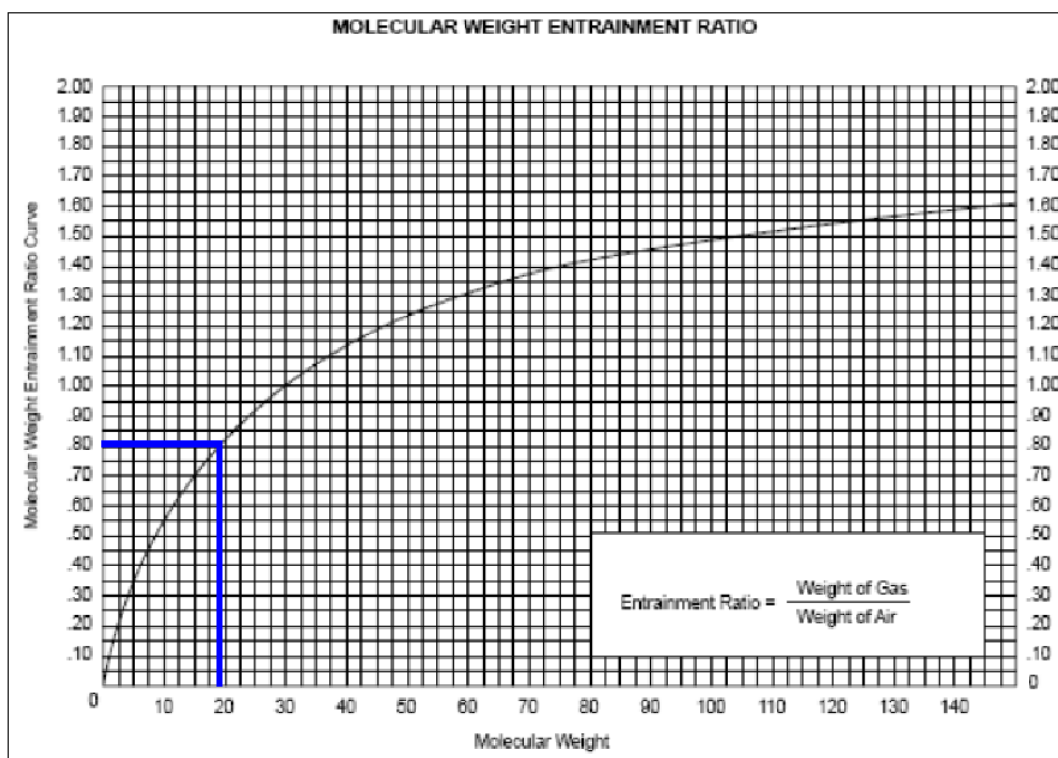
$$M_{mv} := \frac{P_{vH_2O}}{P_{op} - P_{vH_2O}} \cdot \frac{M_{nc_aux} \cdot 18}{PM_{nc}} = 3.093 \times 10^3$$

está en kg/hr

Según el procedimiento de cálculo seguido butterwoth-heinemann se halla la cantidad de vapor equivalente de vapor que se succiona, y depende de la temperatura de operación de los eyectores que es de 29°C y el peso molecular respecto al aire.

$$W_{DAE_vapor} = \frac{M_{mv}}{R_{w_vapor} \cdot R_{T_vapor}}$$

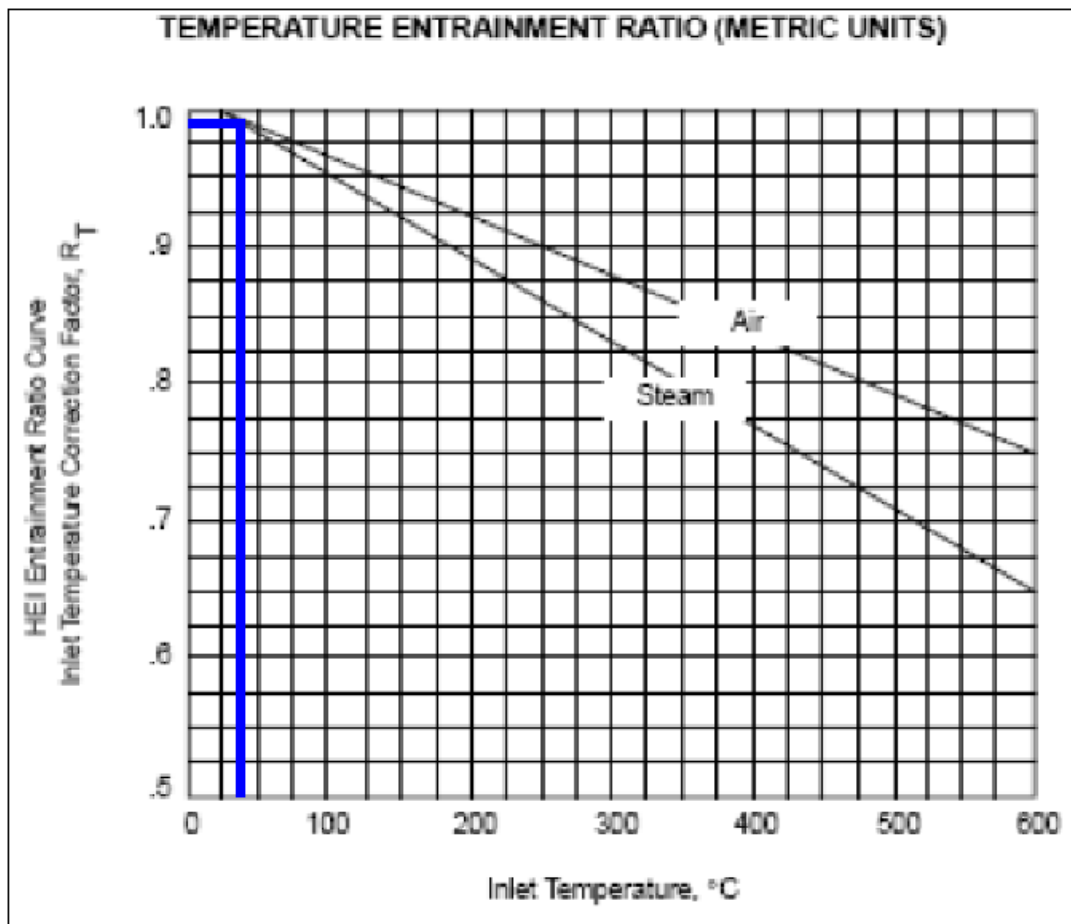
La hallar los coeficientes son sobre tablas que se han sacado de estudios empíricos sacado de la norma del HEI.



Gráfica 25. Utilización de la tabla para hallar el R_w , eyector 1 [6]

Como se puede observa en función del peso molecular del vapor de agua, 18, podemos obtener R_w .

A continuación en función de la temperatura a 29 °C (temperatura de diseño) se obtiene R_T .



Gráfica 26. Utilización de la tabla para hallar el R_T , eyector 1 [6]

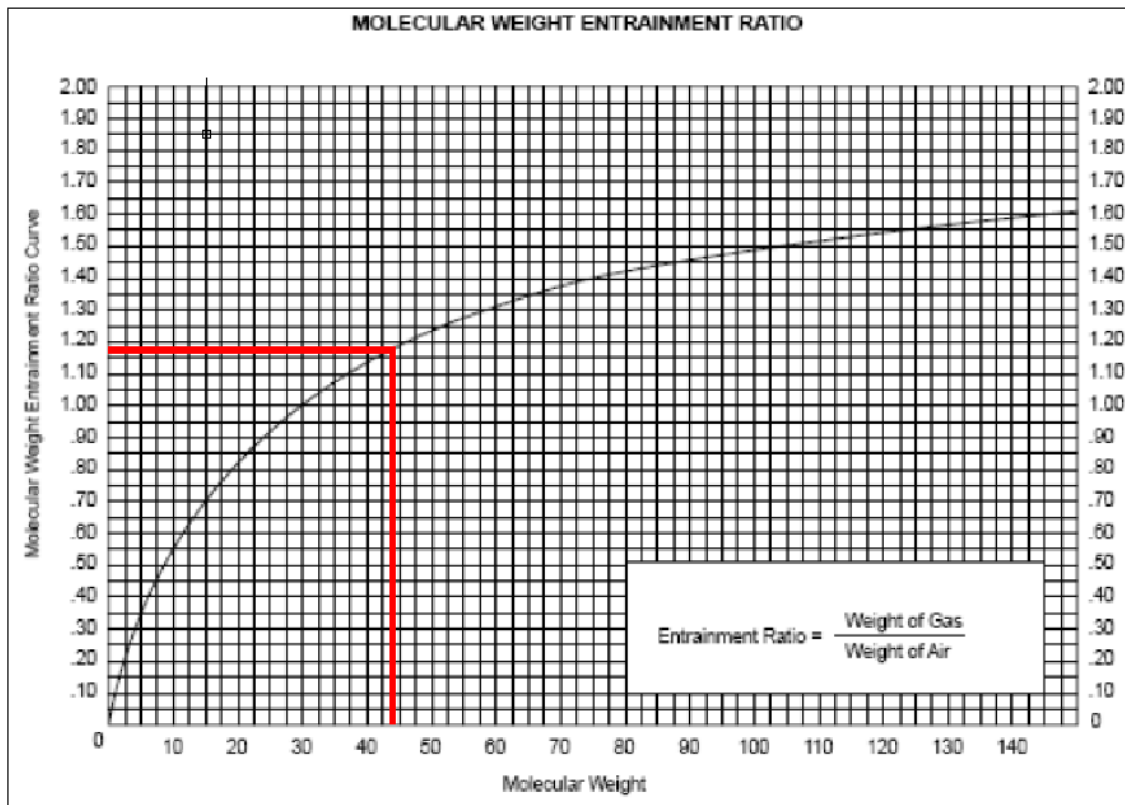
Calculando la fórmula del vapor equivalente en función de los datos de la tabla:

$$R_{w_vapor1} := 0.81 \quad R_{T_vapor1} := 0.95$$

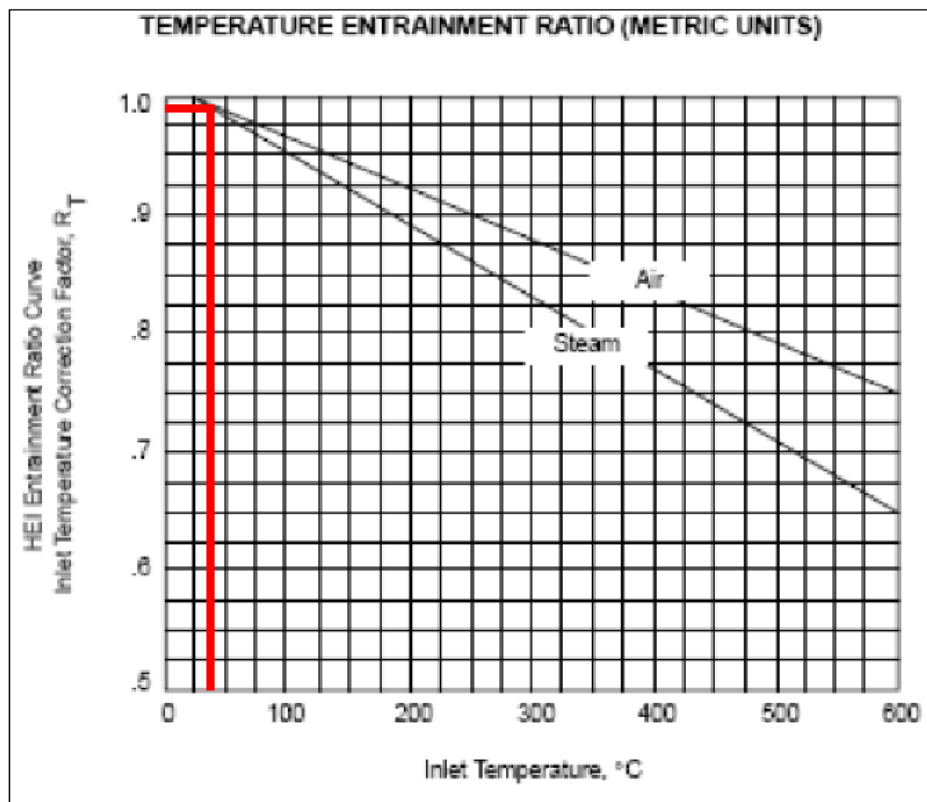
$$W_{DAE_vapor1} := \frac{M_{mv}}{R_{w_vapor1} \cdot R_{T_vapor1}} = 3.858 \times 10^3 \quad \text{está en kg/hr}$$

Siguiendo el mismo proceso para los incondensables

$$W_{DAE_nc1} = \frac{M_{nc_aux1}}{R_{w_nc1} \cdot R_{T_nc1}}$$



Gráfica 27. Utilización de la grafica para hallar el R_w , eyector 1 [6]



Gráfica 28. Utilización de la grafica para hallar el R_t , eyector 1 [6]

$$R_{W_nc1} := 1.17$$

$$R_{T_nc1} := 0.95$$

$$W_{DAE_nc1} := \frac{M_{nc_aux}}{R_{W_nc1} \cdot R_{T_nc1}} = 1.823 \times 10^3 \quad \text{está en kg/hr}$$

Por lo que se puede hallar el flujo másico equivalente que saldría del condensador barométrico principal.

$$W_{DAE_tot1} := W_{DAE_nc1} + W_{DAE_vapor1} = 5.681 \times 10^3$$

$$W_{DAE_tot_aux} := \frac{W_{DAE_tot1}}{3600} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1.578 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Es necesario hallar el flujo másico motriz que será capaz de comprimir fluido, y lo hallaremos por medio de

$$W_{motriz1} = W_{DAE_tot1} \cdot R_{mw_1} \cdot R_{T_1}$$

Siendo R_W y R_T , se obtienen de las mismas tablas que las utilizadas antes, con la salvedad de que el valor de R_{WV} van a ser respecto el vapor de agua y el R_T en función de la temperatura de entrada del fluido motriz.

La temperatura del vapor se supone que es vapor saturado a la salida del yacimiento. Por tanto habrá sufrido una pérdida de carga de 0.1 bar al haber superado la barrera de del separador ciclónicos y el demister.

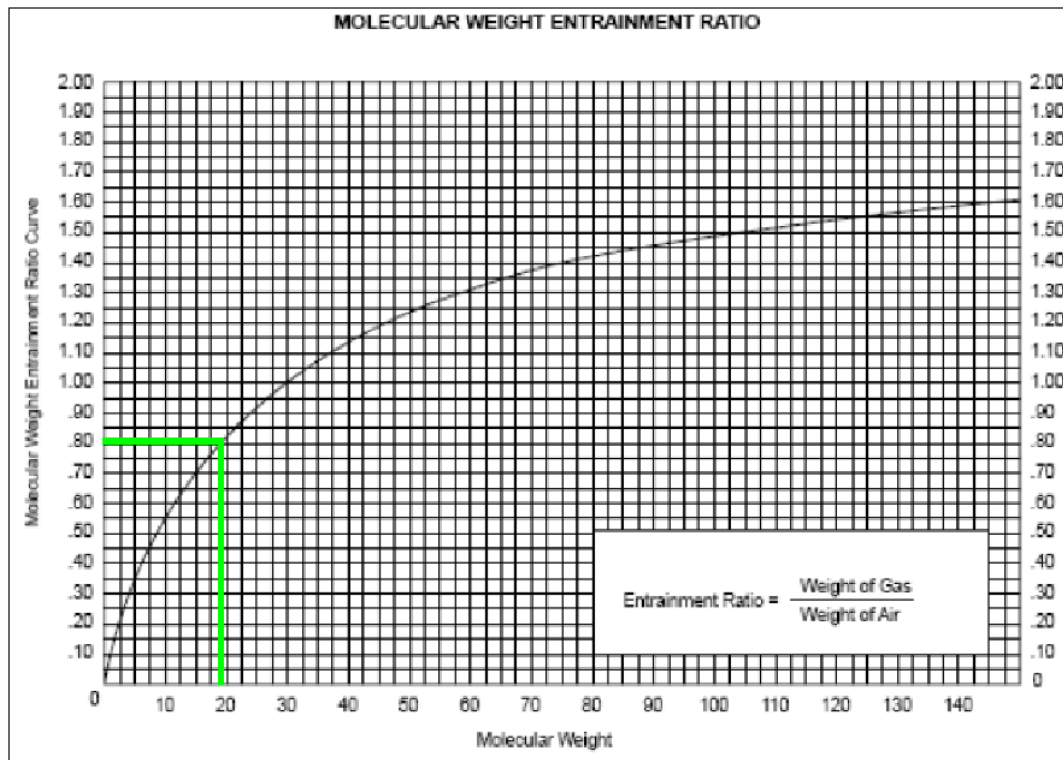
$$P_6 := 1.983 \text{ bar}$$

$$P_7 := P_6 - 0.1 \text{ bar} = 1.883 \times 10^5 \text{ Pa}$$

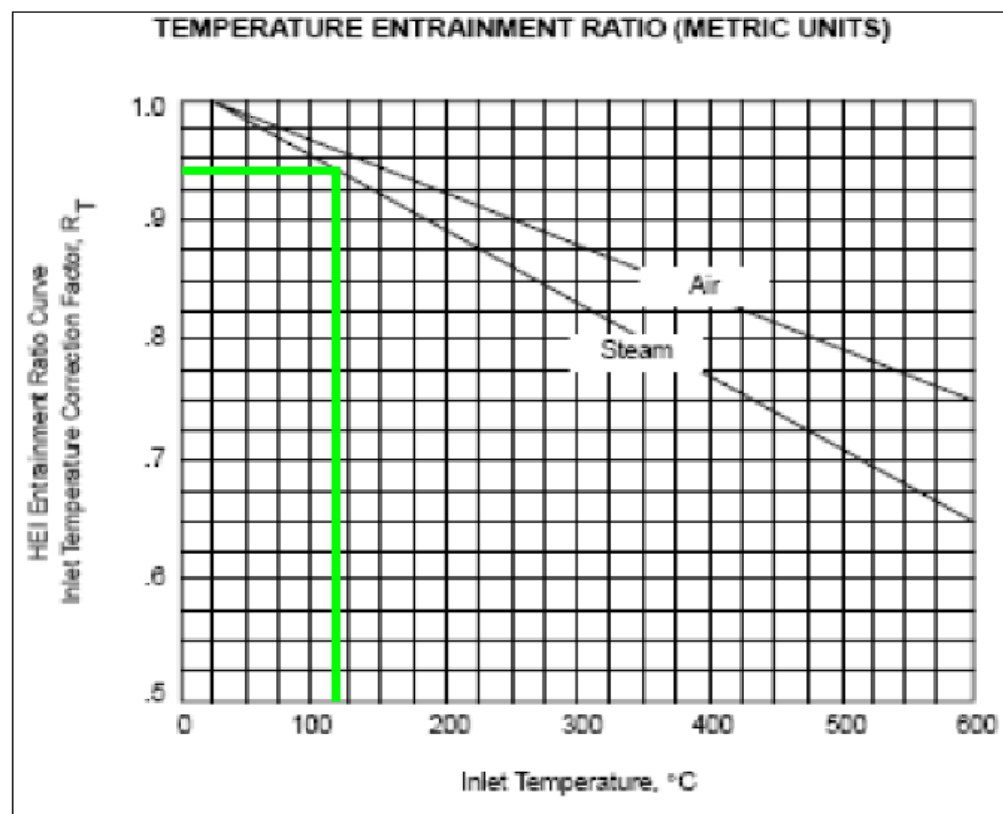
El vapor saturado a esa temperatura es de

$$T_7 := 118.37^\circ\text{C}$$

Mediante las tablas



Gráfica 29. Utilización de la grafica para hallar el R_w , eyector 1 [6]



Gráfica 30. Utilización de la grafica para hallar el R_t , eyector 1 [6]

Siendo entonces

$$R_{mw_1} := 0.81$$

$$R_{T_1} := 0.945$$

Para calcular R_3 se parte de un nomograma, pero para utilizarlo se debe calcular el ratio de expansión entre fluido succionado del condensador y el fluido motriz. Además del ratio de compresión entre la succión del fluido succionado y la mezcla de los fluidos al salir del eyector de vapor.

Como ya se ha comentado para el enfriamiento de los gases incondensables y la condensación de la mayor cantidad de vapor de agua se utiliza dos etapas con dos eyectores de vapor. No se deduce en principio la presión interetapa entre un eyector y el siguiente. Pero lo que se sabe es, la presión a la salida del segundo eyector de vapor será de 1.05 bar. Al pasar el segundo intercondensador la presión de los vapores no incondensables será de un bar.

Para determinar la presión interetapa, según la experiencia del HEI se estima que como aproximación será calculando la relación de compresión total de los dos eyectores, haciendo su raíz y multiplicando por 1,2. Así sacaremos el valor de la relación de compresión de la primera etapa y con eso las dos presiones.

Debe tenerse en cuenta además para la segunda etapa se considerará la misma temperatura de funcionamiento.

$$P_{13} := 1.05 \text{ bar}$$

$$P_3 = 7 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\pi_{c1} := \left(\frac{P_{13}}{P_3} \right)^{0.5} \cdot 1.2 = 4.648$$

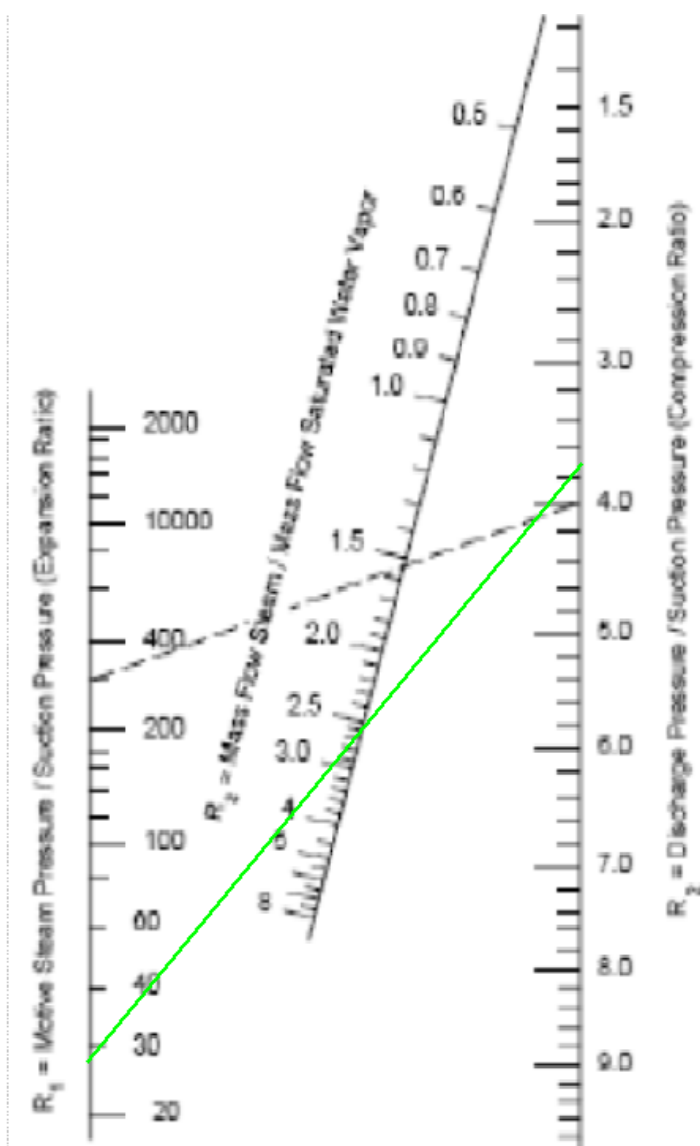
La presión a la salida del primer eyector es:

$$P_8 := P_3 \cdot \pi_{c1} = 3.253 \times 10^4 \text{ Pa}$$

La relación de expansión es

$$\pi_{e1} := \frac{P_7}{P_3} = 26.904$$

Con los datos de la relación de compresión y de la expansión



Gráfica 31. Utilización de la nomograma hallar el R3, eyector 1 [6]

$$R_{3_1} := 2.5$$

$$W_{\text{motriz1_aux}} := W_{\text{DAE_tot1}} \cdot R_{\text{mw_1}} \cdot R_{\text{T_1}} \cdot R_{3_1} = 1.087 \times 10^4 \quad \text{en kg/h}$$

Pasando a kg/s

$$W_{\text{motriz1}} := \frac{W_{\text{motriz1_aux}} \cdot \text{kg}}{3600 \text{ s}} = 3.02 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

EYECTOR 2

Para el segundo eyector se utiliza el mismo procedimiento de cálculo. La cantidad de gases incondensables, procedente del condensador principal seguirá



siendo la misma. Como su nombre indica son incondensables son los que se expulsarán a la torre de refrigeración los cual los enviará a la atmosfera. Estos gases no son dañinos , ya que principalmente son aire.

$$M_{nc2} := m_7 \cdot 0.02 = 0.587 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad P_{vH2O_2} := 35.0 \text{ está en mm Hg}$$

corresponde con la temperatura de saturación a 29 °C

$$M_{nc_aux2} := \frac{M_{nc}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \cdot 3600 = 2.112 \times 10^3 \quad P_{op2} := 244 \text{ está en mm Hg}$$

$$M_{mv2} := \frac{P_{vH2O_2}}{P_{op2} - P_{vH2O_2}} \cdot \frac{M_{nc_aux2} \cdot 18}{PM_{nc}} = 146.883 \text{ está en kg/hr}$$

La temperatura del vapor sigue siendo de 29°C, lo que cambian son las condiciones de entrada del condensador.

Se halla el vapor equivalente, mediante las mismas gráficas

Como la temperatura de diseño y el peso molecular se considera que es la misma que el del primer eyector los coeficientes de $R_{w_vapor_2}$ y $R_{T_vapor_2}$ serán iguales que en el primer eyector.

$$R_{w_vapor2} := 0.81 \quad R_{T_vapor2} := 0.95$$

$$W_{DAE_vapor2} := \frac{M_{mv2}}{R_{w_vapor2} \cdot R_{T_vapor2}} = 183.168 \text{ está en kg/hr}$$

Los gases incondensables

$$W_{DAE_nc2} = \frac{M_{nc_aux2}}{R_{w_nc2} \cdot R_{T_nc2}}$$

$$R_{w_nc2} := 1.17 \quad R_{T_nc2} := 0.95$$

$$W_{DAE_nc2} := \frac{M_{nc_aux2}}{R_{w_nc1} \cdot R_{T_nc1}} = 1.823 \times 10^3 \text{ está en kg/hr}$$

Con esto hallamos el flujo másico que saldría del primer intercondensador barométrico



$$W_{DAE_tot2} := W_{DAE_nc2} + W_{DAE_vapor2} = 2.007 \times 10^3$$

$$W_{DAE_tot_aux2} := \frac{W_{DAE_tot2}}{3600} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0.557 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Lo queda por determinar es la cantidad de flujo motriz es necesario para condensar el mayor vapor posible y expulsar los gases incondensables a la atmósfera.

Como en el primer eyector tenemos el valor de R_T y R_{WV} por tanto sólo hace falta el valor de R_3 el cual hallaremos con el nomograma y los valores de expansión y compresión del fluido que pasa por los eyectores.

Antes de hallar la relación de compresión se le debe eliminar la presión correspondiente al paso por el intercondensador.

$$P_9 := P_8 - 0.01 \text{ bar} = 3.153 \times 10^4 \text{ Pa}$$

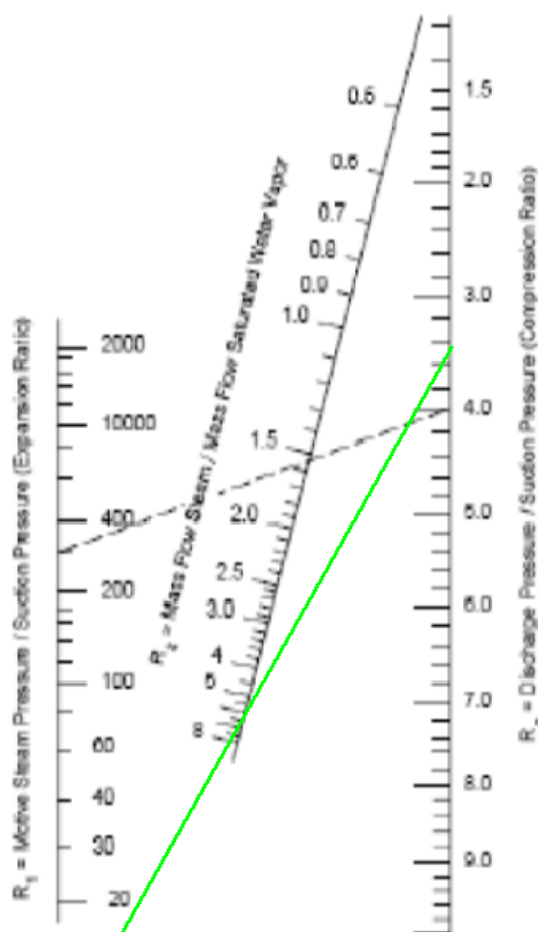
La relación de compresión

$$\pi_{c2} := \frac{P_{13}}{P_9} = 3.33$$

La relación de expansión

$$\pi_{e2} := \frac{P_7}{P_9} = 5.972$$

Mediante el nomograma se halla:



Gráfica 32. Utilización de la nomograma hallar el R3, eyector 2 [6]

$$R_{3_2} := 5$$

$$W_{\text{motriz2_aux}} := W_{\text{DAE_tot1}} \cdot R_{\text{mw_1}} \cdot R_{\text{T_1}} \cdot R_{3_2} = 2.174 \times 10^4 \quad \text{está en kg/hr}$$

Siendo en kg/s

$$W_{\text{motriz2}} := \frac{W_{\text{motriz2_aux}} \text{ kg}}{3600 \text{ s}} = 6.04 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

DIMENSIONES DEL EYECTOR DE VAPOR

Para hallar las dimensiones del eyector nos basaremos en el volumen específico del aire, el volumen específico del vapor respecto al aire es minúsculo. Además para las velocidades de la salida de incondensables nos basaremos en el libro de Hugot, el cual muestra velocidades recomendadas para el vapor. Además koerting utiliza estas recomendaciones de diseño para dimensionar los eyectores. Nos ponemos en el peor de las situaciones en donde las velocidades son bajas.

Lo primero será hallar mediante un balance la velocidad en el estrangulamiento.

- EYECTOR 1

$$v_{\text{motriz1}} := 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad v_{\text{sal_cond1}} := 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$W_{\text{DAE_tot_aux1}} \cdot v_{\text{sal_cond1}} + W_{\text{motriz1}} \cdot v_{\text{motriz1}} = (W_{\text{DAE_tot_aux1}} + W_{\text{motriz1}}) \cdot v_{\text{mezcla}}$$

$$v_{\text{mezcla1}} := \frac{W_{\text{DAE_tot_aux1}} \cdot v_{\text{sal_cond1}} + W_{\text{motriz1}} \cdot v_{\text{motriz1}}}{(W_{\text{DAE_tot_aux1}} + W_{\text{motriz1}})} = 37.987 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Como no varía en exceso el volumen específico se estimará el valor medio entre la entrada y salida del eyector:

$$v_{e1} := 1.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Como

$$\text{masa} = \text{densidad} \cdot \text{velocidad} \cdot \text{area} \quad \text{area} = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4}$$

$$D_{T1} := \left[\frac{4 \cdot \left[\frac{(W_{\text{DAE_tot_aux2}} + W_{\text{motriz2}})}{v_{e2} \cdot v_{\text{mezcla1}}} \right]}{\pi} \right]^{0.5} = 0.416 \text{m}$$

Según los estudios más recientes, se ha expresado unas longitudes en función del tamaño del estrangulamiento para eyectores de vapor.

REF.	LONGITUD				ÁNGULO (°)	
TEORÍA	GARGANTA	DIFUSOR	LONGITUD TOTAL	DESDE EL INYECTOR AL FINAL DE CONICIDAD	CONVERGENTE	DIVERGENTE
SÍMBOLO	D_T	R	S	X	α	θ
Kravath (año 1940)	$1 \cdot D_T$	$12 \cdot D_T$	$15 \cdot D_T$	$2 \cdot D_T$	28	5

Tabla 25. Longitudes de los eyectores a partir de la dimensiones de sus garganta [5], [25]

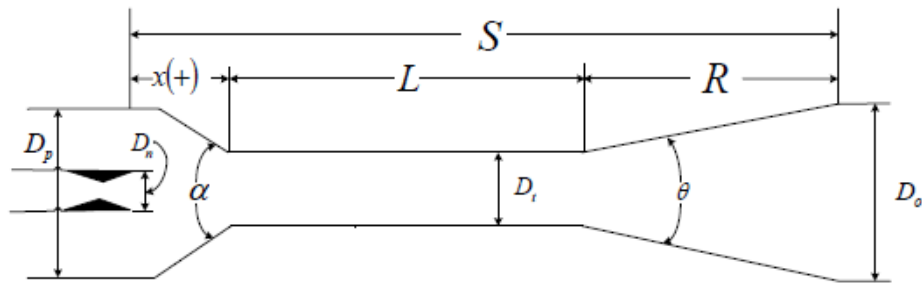


Figura 76. Representación de las longitudes de cálculo del eyector de vapor [5]

$$S_1 := 15D_{T1} = 6.234\text{m} \quad R_1 := 12D_{T1} = 4.988\text{m} \quad X_1 := 2 \cdot D_{T1} = 0.831\text{m}$$

La sección del fluido arrastrado es el diámetro calculado en los condensadores barométricos

- EYECTOR 2

$$v_{\text{motriz2}} := 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad v_{\text{sal_cond2}} := 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$W_{\text{DAE_tot_aux2}} \cdot v_{\text{sal_cond}} + W_{\text{motriz2}} v_{\text{motriz}} = (W_{\text{DAE_tot_aux2}} + W_{\text{motriz2}}) \cdot v_{\text{mezcla}}$$

$$v_{\text{mezcla2}} := \frac{W_{\text{DAE_tot_aux2}} \cdot v_{\text{sal_cond2}} + W_{\text{motriz2}} v_{\text{motriz2}}}{(W_{\text{DAE_tot_aux2}} + W_{\text{motriz2}})} = 48.31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Como no varía en exceso el volumen específico se estimará el valor medio entre la entrada y salida del eyector:

$$V_{e2} := 1.28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{masa} = \text{densidad} \cdot \text{velocidad} \cdot \text{area} \quad \text{area} = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4}$$

$$D_{T2} := \left[\frac{4 \cdot \left[\frac{(W_{\text{DAE_tot_aux2}} + W_{\text{motriz2}})}{V_{e2} \cdot v_{\text{mezcla2}}} \right]^{0.5}}{\pi} \right] = 0.369\text{m}$$



$$S_2 := 15D_{T2} = 5.528\text{m}$$

$$R_2 := 12D_{T2} = 4.423\text{m}$$

$$X_2 := 2 \cdot D_{T2} = 0.737\text{m}$$

CÁLCULO DEL EYECTORES PARA UN FLUIDO GEOTÉRMICO A 150°C

Para el funcionamiento en estas condiciones de trabajo, el procedimiento es totalmente el mismo, por eso se procede a poner una tabla de los detalles más característicos del cálculo.

- EYECTOR 1

CANTIDAD DE VAPOR ARRASTRADO	1 kg/s
CANTIDAD DE INCONDENSABLES	0.48 kg/s
CANTIDAD DE VAPOR MOTRIZ	2.54 kg/s
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	29°C
PRESIÓN ENTRADA ARRASTRADO	0.06 bar
PRESIÓN ENTRADA MOTRIZ	5 bar
PRESIÓN SALIDA MEZCLA	0.33 bar
RELACION DE EXPANSION	70
RELACION DE COMPRESIÓN	4.65
VELOCIDAD ARRASTRADO	45 m/s
VELOCIDAD MOTRIZ	60 m/s
VELOCIDAD MEZCLA	54.47 m/s
DIÁMETRO GARGANTA	0.3 m
LONGITUD TOTAL	4.5 m
DESDE EL INYECTOR AL FINAL DE CONICIDAD	0.6 m
LONGITUD DE GARGANTA	0.3 m
LONGITUD DIFUSOR	3.65 m

Tabla 26. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 1 (150°C)

Los ángulos son los mismos en todos los casos

- EYECTOR 2

CANTIDAD DE VAPOR ARRASTRADO	0.05 kg/s
CANTIDAD DE INCONDENSABLES	0.48 kg/s
CANTIDAD DE VAPOR MOTRIZ	4.41 kg/s
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	29°C
PRESIÓN ENTRADA ARRASTRADO	0.31 bar
PRESIÓN ENTRADA MOTRIZ	5 bar
PRESIÓN SALIDA MEZCLA	1.05 bar
RELACION DE EXPANSION	15.54
RELACION DE COMPRESIÓN	3.33
VELOCIDAD ARRASTRADO	20 m/s
VELOCIDAD MOTRIZ	60 m/s
VELOCIDAD MEZCLA	55.76 m/s
DIÁMETRO GARGANTA	0.3 m



LONGITUD TOTAL	4.45 m
DESDE EL INYECTOR AL FINAL DE CONICIDAD	0.59 m
LONGITUD DE GARGANTA	0.3 m
LONGITUD DIFUSOR	3.56 m

Tabla 27. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 2 (150°C)

Los ángulos son los mismos en todos los casos

CÁLCULO DEL EYECTORES PARA UN FLUIDO GEOTÉRMICO A 180°C

Para el funcionamiento en estas condiciones de trabajo, el procedimiento es totalmente el mismo, por eso se procede a poner una tabla de los detalles más característicos del cálculo.

- EYECTOR 1

CANTIDAD DE VAPOR ARRASTRADO	0.96 kg/s
CANTIDAD DE INCONDENSABLES	0.45 kg/s
CANTIDAD DE VAPOR MOTRIZ	2.16 kg/s
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	29°C
PRESIÓN ENTRADA ARRASTRADO	0.06 bar
PRESIÓN ENTRADA MOTRIZ	10 bar
PRESIÓN SALIDA MEZCLA	0.33 bar
RELACION DE EXPANSION	141.43
RELACION DE COMPRESIÓN	4.65
VELOCIDAD ARRASTRADO	15 m/s
VELOCIDAD MOTRIZ	70 m/s
VELOCIDAD MEZCLA	48.27 m/s
DIÁMETRO GARGANTA	0.27 m
LONGITUD TOTAL	4.08 m
DESDE EL INYECTOR AL FINAL DE CONICIDAD	0.54 m
LONGITUD DE GARGANTA	0.27 m
LONGITUD DIFUSOR	3.62 m

Tabla 28. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 1 (180°C)

Los ángulos son los mismos en todos los casos

- EYECTOR 2

CANTIDAD DE VAPOR ARRASTRADO	0.04 kg/s
CANTIDAD DE INCONDENSABLES	0.45 kg/s
CANTIDAD DE VAPOR MOTRIZ	3.09 kg/s
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	29°C
PRESIÓN ENTRADA ARRASTRADO	0.31 bar
PRESIÓN ENTRADA MOTRIZ	10 bar
PRESIÓN SALIDA MEZCLA	1.05 bar
RELACION DE EXPANSION	3.33
RELACION DE COMPRESIÓN	31.4
VELOCIDAD ARRASTRADO	30 m/s
VELOCIDAD MOTRIZ	70 m/s
VELOCIDAD MEZCLA	64.44 m/s
DIÁMETRO GARGANTA	0.24 m



LONGITUD TOTAL	3.53 m
DESDE EL INYECTOR AL FINAL DE CONICIDAD	0.47 m
LONGITUD DE GARGANTA	0.24 m
LONGITUD DIFUSOR	2.83 m

Tabla 29. Resumen de los parámetros más característicos del eyector 2 (180°C)

Los ángulos son los mismos en todos los casos

El caso de las velocidades aumenta ya que también la sección disminuye, en cada situación.

ANEXO 3 (TABLAS)

TABLA A.6 Propiedades termofísicas de agua saturada^a

Tempera- tura, T (K)	Presión P (bars) ^b	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía de vapo- rización h_{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m ²)		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de expan- sión $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Tempe- ratura T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

Tabla 30. Propiedades del agua saturada [17]

t (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	1.749

Tabla 31. Propiedades del agua líquida a 1 atmósfera [17]

Air temperature (°F)	Gauge Pressure (psi)											
	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	0.081	0.109	0.136	0.192	0.247	0.302	0.357	0.412	0.467	0.522	0.578	0.633
40	0.080	0.107	0.134	0.188	0.242	0.295	0.350	0.404	0.458	0.512	0.566	0.620
50	0.078	0.105	0.131	0.185	0.238	0.291	0.344	0.397	0.451	0.504	0.557	0.610
60	0.076	0.102	0.128	0.180	0.232	0.284	0.336	0.388	0.440	0.492	0.544	0.596
70	0.075	0.101	0.126	0.177	0.228	0.279	0.330	0.381	0.432	0.483	0.534	0.585
80	0.074	0.099	0.124	0.174	0.224	0.274	0.324	0.374	0.424	0.474	0.524	0.574
90	0.072	0.097	0.121	0.171	0.220	0.269	0.318	0.367	0.416	0.465	0.515	0.564
100	0.071	0.095	0.119	0.168	0.216	0.264	0.312	0.361	0.409	0.457	0.505	0.554
120	0.069	0.092	0.115	0.162	0.208	0.255	0.302	0.348	0.395	0.441	0.488	0.535
140	0.066	0.089	0.111	0.156	0.201	0.246	0.291	0.337	0.382	0.427	0.472	0.517
150	0.065	0.087	0.109	0.154	0.198	0.242	0.287	0.331	0.375	0.420	0.464	0.508
200	0.060	0.081	0.101	0.142	0.183	0.225	0.265	0.306	0.347	0.388	0.429	0.470
250	0.056	0.075	0.094	0.132	0.170	0.208	0.246	0.284	0.322	0.361	0.399	0.437
300	0.052	0.070	0.088	0.123	0.159	0.195	0.230	0.266	0.301	0.337	0.372	0.408
400	0.046	0.062	0.078	0.109	0.141	0.172	0.203	0.235	0.266	0.298	0.329	0.360
500	0.041	0.056	0.070	0.098	0.126	0.154	0.182	0.210	0.238	0.267	0.295	0.323
600	0.038	0.050	0.063	0.089	0.114	0.140	0.165	0.190	0.216	0.241	0.267	0.292

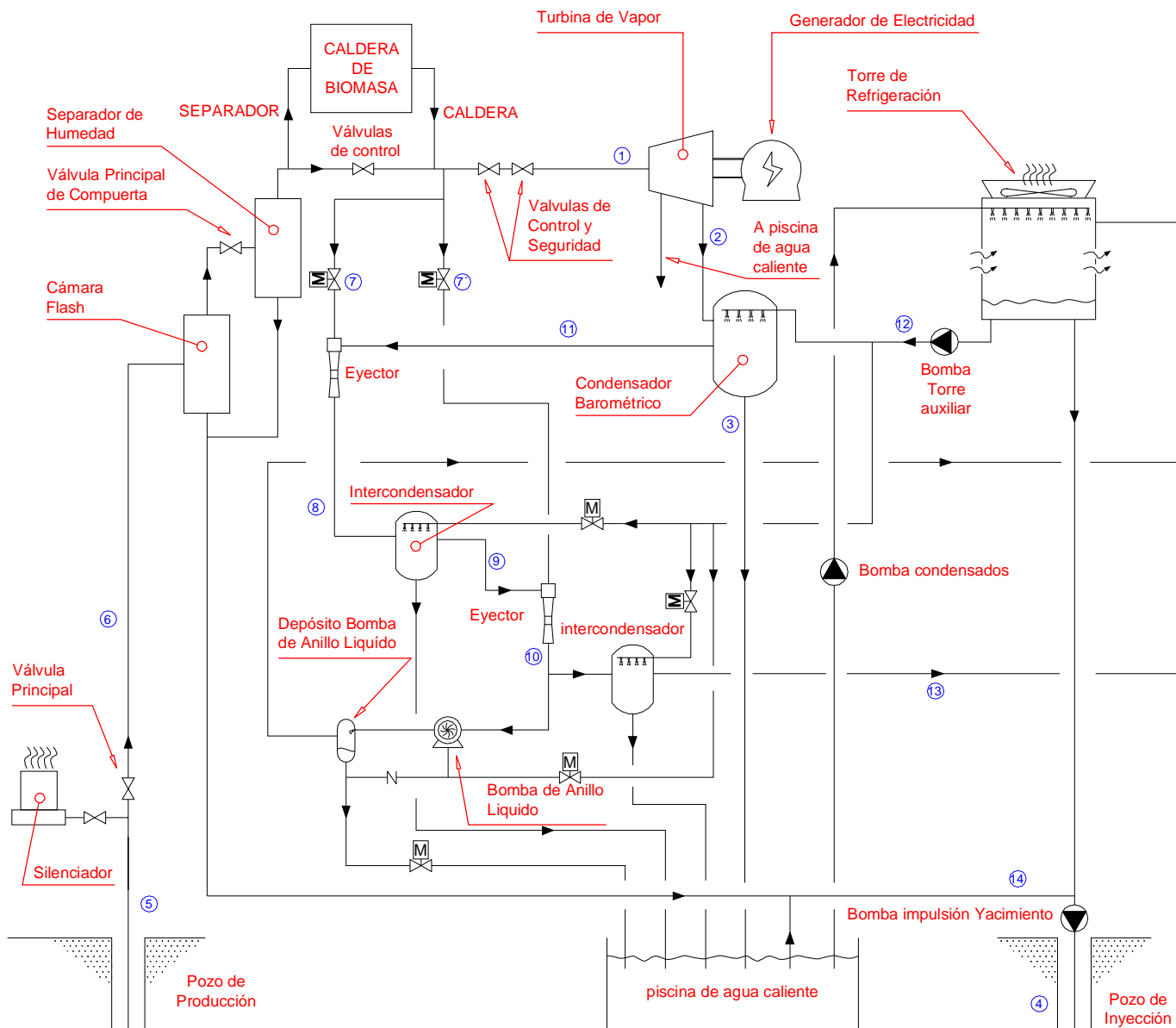
Tabla 32. Densidad del aire en (lb/ft³) a diferentes presiones [2]


PRESIONES (BAR)	RECOMENDACIONES VELOCIDAD VAPOR SATURADO (m/s)
0.03	152
0.05	129
0.07	120
0.1	91
0.28	58

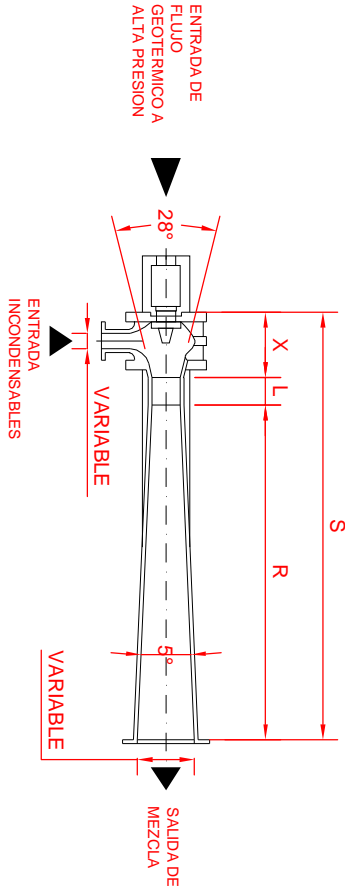
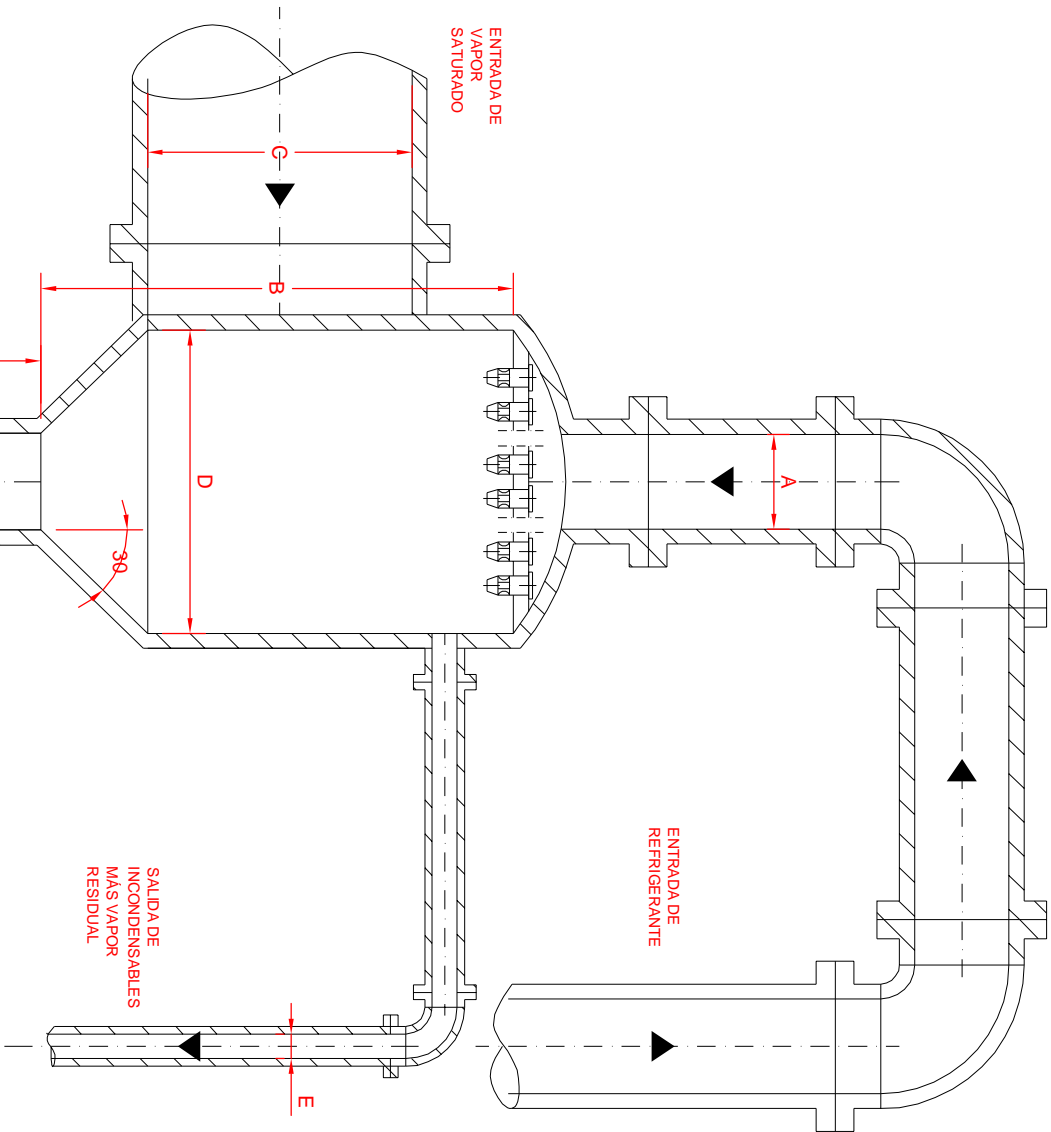
Tabla 33. Extracto de recomendaciones de velocidades (cambiadas las unidades) [5]



14. PLANOS



 Universidad Carlos III de Madrid		PROYECTO CENTRAL GENERACIÓN GEOTÉRMICA. EVALUACIÓN SISTEMA CONDENSACIÓN Y EXTRACCIÓN INCONDENSABLES.	
TUTOR PROYECTO ANTONIO SORIA VERDUGO	PLANO : ESQUEMA DE FINAL DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA DE TIPO FLASH CON APOYO DE UNA CALDERA DE BIOMASA		ESCALA : SE
AUTOR PROYECTO JUAN JAVIER MENDOZA BACHILLER	TITULACIÓN : GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		PLANO Nº : 1
FECHA : FEBRERO 2014	DEPARTAMENTO: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS		



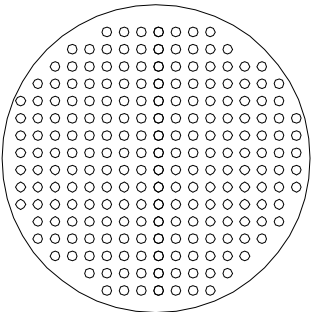
EYECTOR DE VAPOR

ESCALA 1/100

- NOTAS:
1. El dimensionado del condensador barométrico principal es el mostrado en el dibujo. Las medidas en diferente condicione de funcionamiento son las mostradas en las tablas.
 2. La representación de los intercondensadores es igual al condensador principal, ya que también son condensadores barométricos de contacto directo.
 3. La entrada de incondensables más vapor, se expone en el plano como variable, para su medida revisar el anexo 4 de cálculos.
 4. La representación de los rociadores en la sección del condensador es representativa

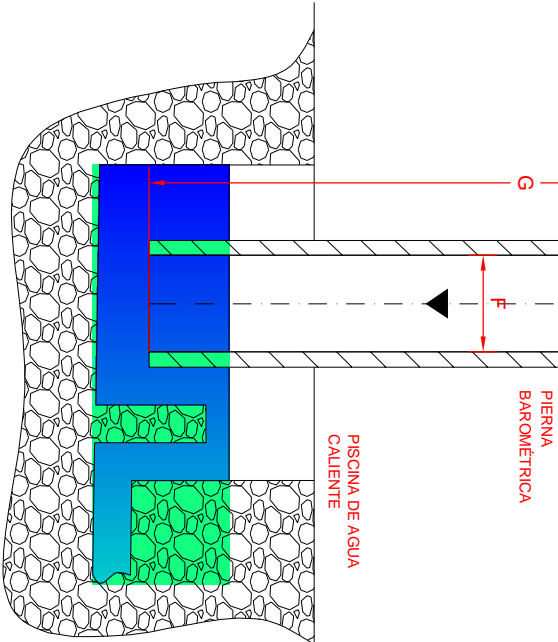
EYECTORES DE VAPOR					
	120°		150°		180°
	EY. 1	EY. 2	EY. 1	EY. 2	EY. 1 EY. 2
Dt	0.42	0.37	0.3	0.3	0.27 0.24
S	6.23	5.53	4.5	4.45	4.08 3.53
X	0.83	0.74	0.6	0.59	0.54 0.47
R	4.99	4.42	3.6	3.56	3.26 2.83
L	0.42	0.37	0.3	0.3	0.27 0.24
α	28	28	28	28	28 28
θ	5	5	5	5	5 5

TODAS LAS MEDIDAS EXPRESADAS EN METROS



DETALLE DISTRIBUCION ROCIADORES

ESCALA 1/100



CONDENSADOR BAROMÉTRICO			
	120°C	150°C	180°C
A	1.25	1.2	1.2
B	4.01	4.84	4.84
C	3.5	3.38	3.34
D	4.84	3.7	3.6
E	0.33	0.32	0.32
F	1.27	1.22	1.19
G	10	9.2	9.2
Nº ROCIADORES	234	216	206

TODAS LAS MEDIDAS EXPRESADAS EN METROS

INTERCONDENSADORES BAROMÉTRICOS 1	
	120°C
A	0.2
B	3.63
C	0.32
D	0.6
E	0.21
F	0.18
G	9.2
Nº ROCIADORES	5

TODAS LAS MEDIDAS EXPRESADAS EN METROS

INTERCONDENSADORES BAROMÉTRICOS 2	
	120°C
A	0.13
B	3.63
C	0.11
D	0.6
E	0.03
F	0.11
G	9.2
Nº ROCIADORES	2

TODAS LAS MEDIDAS EXPRESADAS EN METROS

		PROYECTO CENTRAL GENERACIÓN GEOTÉRMICA. EVALUACIÓN SISTEMA CONDENSACIÓN Y EXTRACCIÓN INCONDENSABLES.	
TUTOR PROYECTO ANTONIO SORIANO VERDUGO	PLANO : DIMENSIONADO DE CONDENSADOR BAROMÉTRICO Y EYECTOR DE VAPOR	ESCALA : SE	
AUTOR PROYECTO JUAN JAVIER MENDOZA BODILIER	TITULACIÓN : GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	PLANO Nº : 2	
FECHA : MARZO 2014	DEPARTAMENTO: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS		

CONDENSADOR BAROMETRICO

ESCALA 1/100